Über Bewegungsprogramme bei willkürlichen Bewegungen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
am Fachbereich Psychologie
der Philipps-Universität Marburg/Lahn

vorgelegt von

HERBERT HEUER

aus Cuxhaven

Marburg 1978

Druck: Mauersberger, Marburg

Über Bewegungsprogramme bei willkürlichen Bewegungen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
am Fachbereich Psychologie
der Philipps-Universität Marburg/Lahn

vorgelegt von

HERBERT HEUER

aus Cuxhaven

Marburg 1978

Druck: Mauersberger, Marburg

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Philipps-Universität Marburg/Lahn als

Dissertation angenommen am 7.2.1978

Tag der mündlichen Prüfung am 23.5.1978

Berichterstatter: Prof. Dr. K. Th. Kalveram

Mitberichterstatter: Prof. Dr. F. Merz

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Seite

S t a n d d e s P r o b l e m s 3

Das Konzept des Bewegungsprogramms 3

Zwei Varianten des Bewegungsprogramm-Konzeptes 5

Einige Vorläufer des Bewegungsprogramm-Konzeptes 6

Eine andere Verwendung des Begriffs "Bewegungsprogramm" 7

Periphere Rückmeldungen 11

Verzögerungen bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen 12

Zielanpassung ablaufender Bewegungen 15

Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen bei Menschen 19

Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen bei Tieren 20

Zur Bewertung der Deafferentierungs-Experimente 22

Kontrolle von Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen 24

Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn 27

Bewegungskomplexität und Reaktionszeit 27

Reproduktion aktiver und passiver Zielbewegungen 30

Kann die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn überhaupt gezeigt werden? 32

Klassen äquivalenter Bewegungen 34

Reaktionszeit als Äquivalenzkriterium 35

Selektive Ermüdung als Äquivalenzkriterium 37

A l l g e m e i n e F r a g e s t e l l u n g 41

Eine Hypothese über selektive Einflüsse willkürlicher Bewegungen aufeinander 41

Zur Auffindbarkeit selektiver Einflüsse 43

Auswahl der Bewegungen 43

Auswahl des Übungsstadiums 44

Auswahl der abhängigen Variablen 45

Seite

Andere Grundlagen einer Beeinflussung 46
Struktur versus Kapazität 47
Innere Repräsentation des Bewegungs-Solls 47
Motorische Endstrecke 49
Speziellere Formulierung der Hypothese 52

V e r s u c h 1 52
Fragestellung 52
Methode 53
Versuchsbedingungen 53
Versuchsablauf 55
Versuchsapparatur 57
Auswertung 60
Ergebnisse 66
Diskussion 69
Einfluß der unterschiedlichen Zeitintervalle 70
Einfluß motivationaler Faktoren 72

V e r s u c h 2 73
Fragestellung 73
Methode 75
Ergebnisse 79
Interpolierte Zielbewegungen anderer Weite 79
Interpolierte Sinusbewegungen 82
Diskussion 84
Innere Repräsentation des Bewegungs-Solls 84
Motorische Endstrecke 85
Motivationale Faktoren 86
Spezielle Aspekte der Versuchsanordnung 87
Bewegungsstabilität 90
Bewegungsprogramme und nervöse Hierarchie 94
Eine versus viele Hierarchien 97

Z u s a m m e n f a s s u n g 101

L i t e r a t u r 103

A n h a n g 121

In neueren Theorien und Modellen zur willkürlichen Bewegung herrschen zwei verschiedene Erklärungsprinzipien vor. Das erste ist das Prinzip der Regelung. Danach wird eine Bewegung als Ergebnis einer fortlaufenden Anpassung der Position des bewegten Körpergliedes an eine Soll-Position aufgefaßt. Das zweite Prinzip ist an der Steuerung eines Computers durch ein Programm orientiert: In Analogie zum Computerprogramm wird ein Bewegungsprogramm postuliert, das die Bewegung steuern soll.

Die Beteiligung von Regelvorgängen an der Ausführung willkürlicher Bewegungen wird praktisch nicht bestritten. Unterschiedliche Auffassungen finden sich dagegen hinsichtlich des zweiten Prinzips. Einige Autoren (z.B. K e e l e, 1976; K e e l e & S u m m e r s, 1976; S c h m i d t, 1975, 1976) gehen davon aus, daß die vorliegenden experimentellen Ergebnisse die Annahme von Bewegungsprogrammen rechtfertigen, andere Autoren (z.B. A d a m s, 1976) betrachten diese Evidenz jedoch als nicht ausreichend. In der vorliegenden Arbeit wird versucht, durch die Untersuchung der Einflüsse verschiedener willkürlicher Bewegungen aufeinander Aufschluß darüber zu gewinnen, ob Bewegungsprogramme an der Ausführung solcher Bewegungen beteiligt sind.

S t a n d d e s P r o b l e m s

Das Konzept des Bewegungsprogramms

Die Definition von Bewegungsprogrammen ist in einem negativen Sinne an der Auffassung orientiert, daß willkürliche Bewegungen ausschließlich das Ergebnis von Regelvorgängen sind. Die verschiedenen Regelungstheorien haben zwei Annahmen gemeinsam:

1) Die durch Propriozeptoren und Exterozeptoren bereitgestellten Rückmeldungen über die Position eines Körpergliedes werden fortlaufend ausgewertet.

2) Aus der Abweichung der rückgemeldeten Gliederposition von der Sollposition - diese Abweichung ist die Regelabweichung - resultiert die zu jedem Zeitpunkt eingenommene Position des bewegten Gliedes. Die Bewegungskommandos sind also jeweils der momentanen oder um kurze Zeit zurückliegenden Regelabweichung zugeordnet.

Regelungstheorien gibt es in unterschiedlichen Varianten. Eine Gruppe von Theorien, die aus der Untersuchung des Tracking entstanden ist, berücksichtigt nur die exterozeptiv angezeigte Regelabweichung. Diese Theorien sind eng an der linearen Regelungstheorie orientiert und hoch formalisiert (z.B. E l l s o n, 1949, 1959; L i c k l i d e r, 1960; K r e n d e l & M c R u e r, 1960; M c R u e r & K r e n d e l, 1959; S c h w e i z e r, 1970). Die formale Beschreibung ist jedoch nur für sehr eng umschriebene Situationen angemessen (P o u l t o n, 1966).

Eine zweite Gruppe von Theorien berücksichtigt zusätzlich zur exterozeptiv angezeigten Regelabweichung die propriozeptiven Rückmeldungen. Die in den Gelenken, Sehnen und Muskeln gelegenen Propriozeptoren liefern in kürzerer Zeit als etwa das Auge Information über die Gliederstellung und so über deren Abweichung von der Soll-Position. Ein Modell mit zwei Regelkreisen wurde von K ü p f m ü l l e r & P o k l e k o w s k i (1956) vorgeschlagen und von V o s s i u s & C h o u d h r y (1958) und V o s s i u s (1961) weiterentwickelt. Dieses Modell ist eng an der Hypothese von M e r t o n (1953, 1977) über die Funktion des Eigenreflexbogens (Servo-Hypothese) orientiert; die Kritik an dieser Hypothese (siehe G r a n i t, 1970, S. 271, 1972; E c c l e s, 1975, S. 149-152; K e e l e & S u m m e r s, 1976) trifft also auch dieses Zwei-Regelkreis-Modell. Andere Modelle mit zwei Regelkreisen wurden beispielsweise von P e w (1970) und L i n n (1974) vorgeschlagen.

Neben mehr oder weniger streng formalisierten Modellen ist eine wenig spezifizierte Auffassung, daß exterozeptive und propriozeptive Rückmeldungen für willkürliche Bewegungen maßgeblich seien, weit verbreitet (z.B. F l e i s h m a n & R i c h, 1963; G i b b s, 1965; L i u, 1968). Dabei werden die beiden Arten peripherer Rückmeldungen bisweilen gar nicht getrennt behandelt, sondern als Rückmeldung über die Gliederposition zusammengefaßt (z.B. C h a s e, 1965a, b; A d a m s, 1971; S c h m i d t, 1975).

Nach der verbreiteten Definition von K e e l e (1968) ist das Bewegungsprogramm-Konzept durch zwei den Annahmen

von Regelungstheorien entgegengesetzte Postulate zu kennzeichnen:

1) Die Bewegung läuft unbeeinflußt von peripheren (exterozeptiven und propriozeptiven) Rückmeldungen ab.
2) Die motorischen Kommandos werden jeweils vor Bewegungsbeginn bereitgestellt bzw., im Fall einer länger dauernden Bewebung, vor Beginn eines Bewegungsabschnittes.

Anhand dieser beiden Postulate kann die empirische Berechtigung des Bewegungsprogramm-Konzeptes geprüft werden. Vor der Diskussion der diesbezüglichen experimentellen Ergebnisse sollen aber noch einige begriffliche Fragen behandelt werden.

Zwei Varianten des Bewegungsprogramm-Konzeptes: Die Definition von K e e l e (1968) gibt zwar Möglichkeiten zur experimentellen Prüfung der Bewegungsprogramm-Hypothese an, macht darüber hinaus aber kaum Aussagen dazu, was unter solchen Programmen zu verstehen sei. Daher finden sich in der Literatur Auffassungen, die zwar unter die Definition von K e e l e subsumiert werden können, aber den durch diese Definition gelassenen Spielraum unterschiedlich ausfüllen. Im wesentlichen sind zwei solche Auffassungen von Bedeutung, die sich in erster Linie in den Annahmen über die Zuordnung von einzelnen Bewegungen zu verschiedenen Programmen unterscheiden.

Nach H e n r y & R o g e r s (1960) liegt für jede Bewegung ein eigenes Programm gespeichert vor. Die Autoren orientieren sich an der Analogie zum Trommelspeicher eines Rechners: Analog der Verlagerung eines Programms vom peripheren Trommelspeicher in den Arbeitsspeicher eines Rechners soll das Programm für eine Bewegung aus dem "neuromotorischen Gedächtnis" in die für die Bewegung maßgeblichen nervösen Strukturen verlagert werden. K l a p p u.a. (1974) und K l a p p (1975) nehmen ebenfalls ein eigenes Programm für jede Bewegung an; es ist jedoch nicht ganz klar, ob sie auch von gespeicherten

Programmen ausgehen oder aber davon, daß jeweils erst vor Beginn einer Bewegung das entsprechende Programm erstellt wird.

Die zweite Auffassung wurde in den letzten Jahren vor allem von P e w (1974) und S c h m i d t (1975, 1976) vertreten, aber auch schon von M e g a w (1972a) und K a l v e r a m u.a. (1973) erwähnt. Danach steuert ein Bewegungsprogramm jeweils eine Gruppe von Bewegungen, deren genauer Verlauf erst durch weitere Spezifikationen (die z.B. Stärke und Dauer der Kontraktionen der beteiligten Muskeln betreffen) festgelegt wird. In Analogie zum Computer-Programm sollen diese weiteren Spezifikationen als Programm-Parameter bezeichnet werden. Nach dieser Auffassung gehen der Ausführung einer Bewegung zwei Schritte voraus:

1. Entsprechend der auszuführenden Bewegung wird ein gespeichertes Bewegungsprogramm aufgerufen.
2. In das aufgerufene Programm werden die Parameter entsprechend der geforderten Bewegung eingesetzt.

Diese zweite Auffassung hat empirische Implikationen, die die Formulierung weiterer Kriterien für die Annahme von Bewegungsprogrammen - neben den beiden von K e e l e genannten - erlauben. Darauf werde ich in einem späteren Abschnitt zurückkommen.

Einige Vorläufer des Bewegungsprogramm-Konzeptes: Die beiden beschriebenen Erklärungsprinzipien für willkürliche Bewegungen - Auswertung peripherer Rückmeldungen und Steuerung durch Bewegungsprogramme - können als spezielle Varianten der Positionen einer alten und relativ generellen Kontroverse aufgefaßt werden, die sich als Peripheralismus versus Zentralismus kennzeichnen läßt (siehe K e l s o & S t e l m a c h, 1976). Als wohl wesentlichster Exponent einer zentralistischen Auffassung kann L a s h l e y (1917, 1951) gelten: er betont die Bedeutung zentraler Prozesse bei der Willkürbewegung und wendet sich gegen die peripheralistische Auffassung, nach der

Bewegungen durch Reflexketten erklärt werden. Im deutschsprachigen Raum wird eine recht ähnliche gegen Reflexketten-Theorien gerichtete Position von v. H o l s t (1937, 1939) vertreten.

In einer eher angewandten Forschungsrichtung finden sich ebenfalls Auffassungen, die dem Konzept des Bewegungsprogramms sehr ähnlich sind. C r a i k (1947, 1948) spricht von "ballistischen Bewegungen", deren Verlauf im voraus berechnet wird und die dann ohne periphere Rückmeldungen ablaufen. Für die Interpretation des Verlaufs von Zielbewegungen verwenden T a y l o r & B i r m i n g h a m (1948) das Analogon einer Nockensteuerung; eine Nockenwelle stellt eine mechanische Form eines Programms dar.

In deutschen Arbeiten zur Psychomotorik ist das Konzept des Bewegungsentwurfs geläufig; damit ist eine zumindest teilweise innere Vorwegnahme der auszuführenden Bewegung gemeint. (Eine ausführliche Darstellung dieses Konzepts findet sich bei R ü s s e l, 1976, S. 32-39). Auch der Begriff der Rahmenkoordination, der von R ü s s e l (1944) eingeführt wurde, weist Ähnlichkeiten mit dem Bewegungsprogramm-Konzept auf. Die Rahmenkoordination soll die Grundzüge einer Bewegung festlegen, während deren Einzelheiten durch die Feinkoordination festgelegt werden; die Unterscheidung beider Formen der Koordination beruht auf der Beobachtung, daß bestimmte Aspekte von Bewegungen leicht vergessen werden, andere aber kaum, und daß einige Aspekte von Bewegungen eher nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip gelernt werden, andere aber allmählich. Eine Beziehung zwischen Rahmen- und Feinkoordination einerseits und Bewegungsprogramm und Programm-Parametern andererseits liegt m.E. auf der Hand.

Eine andere Verwendung des Begriffs "Bewegungsprogramm": Der Begriff des Bewegungsprogramms wird nicht nur im Sinne der Definiton von K e e l e (1968) verwendet. Einige Autoren (z.B. M a r i e n f e l d, 1970;

P o u l t o n, 1973a) sprechen dann von "Steuern nach einem Programm", wenn eine Bewegung nicht einem in der Umwelt vorgegebenen Bewegungs-Soll entspricht, sondern einem nur subjektiv für die Vp vorhandenen. M a r i e n f e l d (1970) verwendet den Begriff zum Beispiel in dem Fall, in dem in einem Tracking-Experiment der Zielpunkt ausgeblendet ist, die Vp ihre Bewegung aber trotzdem gemäß der (imaginären) Vorlage ausführt. Als "Bewegungsprogamm" wird hier also zunächst eine innere Repräsentation der Vorlage bzw. der Soll-Positionen für die Bewegung bezeichnet.

Es ist nicht selbstverständlich, daß ein Bewegungsprogramm im Sinne einer inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls etwas anderes ist als ein Bewegungsprogramm im Sinne vor Bewegungsbeginn bereitgestellter motorischer Kommandos, die die Bewegung unabhängig von peripheren Rückmeldungen steuern. Man kann nämlich die Auffassung vertreten, daß die motorischen Kommandos die Bewegung ja gemäß der Vorlage steuern und somit ebenfalls eine innere Repräsentation des Bewegungs-Solls darstellen (siehe M a c K a y, 1956). Die beiden Verwendungen des Begriffs "Bewegungsprogramm" wären nach dieser Auffassung identisch, denn das Bewegungs-Soll ist danach in Form entsprechender motorischer Kommandos subjektiv repräsentiert. In der Terminologie von P o s n e r (1976, S. 38-51) ist das Bewegungs-Soll dann in Form eines "motorischen Kodes" im Gedächtnis abgelegt und nicht in Form eines "visuellen Kodes", wobei der Begriff "motorischer Kode" dasselbe bezeichnet wie der Begriff "Bewegungsprogramm".

Implizit findet sich eine solche Auffassung beispielsweise in einem Sammelreferat von K e e l e (1976). Er geht von der Definition von K e e l e (1968) aus, spricht dann aber von Bewegungsprogrammen im Zusammenhang von Versuchen, in denen Ziele von Zielbewegungen zu lernen sind. In diesen Versuchen müssen die Vpn anti-

zipieren, welches von mehreren Lämpchen jeweils als nächstes aufleuchtet, indem sie einen Knopf unterhalb des erwarteten Lämpchens drücken. Die ursprüngliche Fragestellung solcher Versuche betrifft die Repräsentation von Ereignis-Sequenzen im Gedächtnis (R e s t l e & B r o w n, 1970; R e s t l e, 1970; R e s t l e & B u r n s i d e, 1972); K e e l e (1976) und K e e l e & S u m m e r s (1976) fragen dagegen nach der "Struktur" von Bewegungsprogrammen. In dieser Änderung der Fragestellung ist also die stillschweigende Annahme enthalten, daß die Ereignis-Sequenz in Form der zugeordneten Bewegungen gelernt wird.

Die Gleichsetzung von innerer Repräsentation des Bewegungs-Solls und Bewegungsprogramm scheint mir jedoch aus verschiedenen Gründen nicht gerechtfertigt. In den Theorien von A d a m s (1971) und S c h m i d t (1975) etwa wird beides wohl unterschieden und getrennt behandelt. Das soll auch hier geschehen: der Begriff des Bewegungsprogramms soll hier nur im Sinne von K e e l e (1968) verwendet werden, nicht aber im Sinne einer inneren Repräsentation der Vorlage. Untersuchungen, die Bewegungsprogramme in diesem zweiten Sinne behandeln - dazu gehören zum Beispiel Untersuchungen, die Antizipationsleistungen betreffen, - werden daher im folgenden nicht berücksichtigt.

Die Gründe, die gegen die Gleichsetzung sprechen, sind vor allem von zweierlei Art:

1) Wenn das Bewegungs-Soll in Form von zugeordneten motorischen Kommandos repräsentiert wäre, sollte eine Änderung der motorischen Kommandos bei gleichbleibender Vorlage zu einer Leistungsbeeinträchtigung führen. In den kurz beschriebenen Experimenten von R e s t l e und Mitarbeitern sollte etwa dann die Antizipationsleistung schlechter werden, wenn die Vpn nicht mehr auf das antizipierte Lämpchen zeigen müssen, sondern es beispielsweise benennen. Es scheint mir recht unwahrscheinlich, daß eine solche Leistungsverschlechterung auftreten sollte, denn die spezielle Form der Bewegungen dürfte in diesen Versuchen von untergeordneter Bedeutung sein. Systematische Untersuchungen speziell mit diesem Paradigma liegen zu dieser Frage allerdings nicht

vor. R u s s e l l (1976) gibt jedoch einen Überblick über andere Experimente, die zeigen, daß die innere Repräsentation eines Bewegungsziels nicht an eine spezielle Bewegung, die zu diesem Ziel führt, gebunden ist.

Die Frage, ob Vorlagen unabhängig von speziellen Bewegungen gelernt werden oder in Form der zugeordneten Bewegungen, wurde bereits in der Auseinandersetzung zwischen kognitiven Lerntheorien und Reiz-Reaktions-Theorien behandelt. In den zur Entscheidung dieser Frage durchgeführten Tierexperimenten, in denen die beim Labyrinthlernen geforderten Bewegungen variiert wurden (z.B. Laufen versus Schwimmen), zeigte sich ebenfalls, daß die Variation der Bewegungen nicht zu einer Leistungseinbuße führt. (Einen Überlick über solche Experimente gibt F o p p a, 1968, S. 141-144.)

2) Wenn das Bewegungs-Soll in Form von entsprechenden motorischen Kommandos subjektiv repräsentiert wäre, sollte nach dem Ende einer Bewegung - bei fehlender Vorlage in der Umwelt - keine Angabe über ihre Genauigkeit möglich sein. Da in diesem Fall die innere Repräsentation der Vorlage und die motorischen Kommandos, die die Bewegung steuern, identisch sein sollten, sollte die Bewegung nur mit sich selbst verglichen werden können; Genauigkeitsangaben könnten daher nur zufällig sein. In zwei Experimenten, in denen die Vpn Bewegungen bestimmter Weite in 150 bzw. 200 Millisekunden auszuführen hatten, fanden S c h m i d t & W h i t e (1972) und S c h m i d t & W r i s b e r g (1973) jedoch, daß die nach Bewegungsende abgegebenen Urteile der Vpn über die zeitliche Genauigkeit jeder Bewegung hoch mit der tatsächlichen Genauigkeit korrelierten. (Die Korrelationen wurden jeweils individuell über eine Folge von Bewegungen berechnet.) Nach diesen Ergebnissen muß es also eine andere Repräsentation des Bewegungs-Solls geben als die motorischen Kommandos, mit der nämlich die durch die motorischen Kommandos gesteuerten Bewegungen verglichen werden können.

Obwohl in diesem Abschnitt für die Unterscheidung von innerer Repräsentation des Bewegungs-Solls und Bewegungsprogrammen argumentiert wurde, soll nicht behauptet werden, daß auf allen Übungsstadien das Bewegungs-Soll unabhängig von den erforderlichen motorischen Kommandos repräsentiert ist. P o s n e r (1976, S. 46-49) etwa nennt einige Alltagsbeobachtungen, die er so interpretiert, daß bei hochgeübten Bewegungen die Vorlage als motorischer Kode, also in Form zugeordneter motorischer Kommandos, subjektiv repräsentiert ist. Die Möglichkeit einer Änderung in der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls von etwa einer räumlichen Vorstellung hin zu motorischen Kommandos ist jedoch eine empirische Frage-

stellung. Sie rechtfertigt es nicht, von vornherein die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls mit einem Bewegungsprogramm gleichzusetzen, denn damit wird im Grunde das empirische Problem per Definition gelöst.

Periphere Rückmeldungen

In diesem und dem nächsten Kapitel sollen Experimente besprochen werden, die die beiden von K e e l e (1968) genannten Kriterien für Bewegungsprogramme prüfen. Nach dem ersten Kriterium müssen willkürliche Bewegungen unbeeinflußt von peripheren Rückmeldungen ablaufen, damit von Bewegungsprogrammen gesprochen werden kann. Dieses Kriterium kann nach S c h m i d t (1972) unter zwei Bedingungen als erfüllt gelten:

1) Es wird gezeigt, daß bei vorhandenen peripheren Rückmeldungen diese für die Bewegung nicht ausgewertet werden.
2) Es wird gezeigt, daß Bewegungen auch nach Ausschaltung peripherer Rückmeldungen noch möglich sind.

Unabhängig von peripheren Rückmeldungen kann natürlich sinnvoll nur für kurze Bewegungen oder für jeweils relativ kurze Abschnitte längerer Bewegungen postuliert werden. Auch dann aber noch erscheint die Annahme, daß vorhandene propriozeptive Rückmeldungen nicht ausgewertet werden, angesichts der Aktivität der Muskelspindeln bei jeder Bewegung zunächst unsinnig: Der Eigenreflexbogen (Gamma-Kreis) ist offenbar an der Ausführung jeder Bewegung beteiligt.

Die Auswertung von peripheren Rückmeldungen auf der Ebene des Rückenmarks ist hier jedoch nicht gemeint (siehe S c h m i d t, 1976). Bei Alpha-Gamma-Koaktivierung - der Hauptmuskel und die kontraktilen Pole der Muskelspindeln werden jeweils in äquivalenter Weise kontrahiert - hat der Gamma-Kreis nur eine überwachende Funktion (K e e l e & S u m m e r s, 1976). Er dient dazu, die motorischen Kommandos höherer zentralnervöser Zentren auch dann in eine entsprechende Bewegung umzusetzen, wenn unerwartete äußere Kräfte auf das bewegte Körperglied wirken. Ein solcher untergeordneter Regelkreis ist für die Frage der Programm-Steuerung irrelevant; in diesem Zusammenhang ist vielmehr nur die Verarbeitung der propriozeptiven Rückmeldungen auf höheren Ebenen des Zentralnervensystems von Bedeutung, nicht aber ihre Verarbeitung auf segmentaler Ebene.

Verzögerungen bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen: Zur Unterstützung der Annahme, daß auch vorhandene periphere Rückmeldungen jeweils für kurze Zeitabschnitte nicht für die Kontrolle des Bewegungsverlaufs ausgewertet werden, wird auf die Verzögerungen verwiesen, die bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen auftreten sollen. Nach diesem verbreiteten Argument ist die zeitliche Verzögerung bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen zu lang, als daß ausschließlich sie für die Kontrolle willkürlicher Bewegungen maßgeblich sein könnten (C r a i k, 1947; G l e n c r o s s, 1973; L a s h l e y, 1951; P o u l t o n, 1966; S c h m i d t, 1969, 1972, 1975; S c h m i d t & R u s s e l l, 1972). Die Verzögerung wird dabei mit der Reaktionszeit gleichgesetzt, die bei exterozeptiven, speziell visuellen, Signalen in der Größenordnung von 200 Millisekunden liegt (W o o d w o r t h & S c h l o s b e r g, 1954, s. 16) und im Bereich von 100 bis 150 Millisekunden bei propriozeptiven Signalen (C h e r n i k o f f & T a y l o r, 1952; K e e l e, 1968; H i g g i n s & A n g e l, 1970).

Warum diese Verzögerung zu lang sein soll, als daß eine Bewegung das Ergebnis kontinuierlicher Rückmeldungs-Verarbeitung sein könnte, wird auf zweierlei Art begründet. Zumeist wird darauf hingewiesen, daß Bewegungen möglich sind, bei denen die Bewegungszeit kürzer ist als die genannten Reaktionszeiten. Das Ende einer solchen Bewegung kann nicht auf der Auswertung peripherer Rückmeldungen beruhen. Die ersten Rückmeldungen fallen nämlich zu Beginn der Bewegung an, und erst eine Reaktionszeit später dürften ihre Wirkungen im Bewegungsverlauf sichtbar werden; die Bewegung müßte daher mindestens die Dauer der Reaktionszeit haben. Einige Autoren (C r a i k, 1947; P o u l t o n, 1966) führen regelungstechnische Überlegungen an. Ein stetiger Regelvorgang mit einer Totzeit in der Größenordnung der Reaktionszeit dürfte entweder instabil sein oder müßte zumindest stark oszillieren, wenn die Führungs-

größe ihren Wert plötzlich ändert (vgl. H a s s e n s t e i n, 1970, S. 50-53).

Fragwürdig an diesem "Verzögerungs-Argument" ist die Annahme, daß die Verzögerung bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen tatsächlich der Reaktionszeit entspricht. Die Situation der Reaktionszeitmessung weicht nämlich in zumindest zweifacher Hinsicht von der bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen ab:

1) Bei der Reaktionszeitmessung sind die Signale, auf die reagiert werden muß, unabhängig von der Vp, während periphere Rückmeldungen von einer Bewegung im Regelfall selbst von der Vp erzeugt werden und so in wesentlich höherem Maße vorhersagbar sein dürften.
2) Bei der Reaktionszeitmessung muß eine Bewegung begonnen werden, bei der Auswertung peripherer Rückmeldungen dagegen eine ablaufende Bewegung modifiziert; letzteres dürfte in den meisten Fällen in kürzerer Zeit möglich sein als eine Bewegung zu beginnen.

Nach diesen Überlegungen ist also zu erwarten, daß die tatsächlich bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen auftretenden Verzögerungen kürzer sind als die Reaktionszeiten.

Versuche, die bei der Verarbeitung visueller Rückmeldungen auftretenden Verzögerungen direkt zu erfassen, werden von C h r i s t i n a (1968) beschrieben. Als wesentlichsten dieser Versuche nennt C h r i s t i n a ein Experiment von K e e l e & P o s n e r (1968) mit einer schon von V i n c e (1948) in ähnlicher Weise verwendeten Methode. Die Vpn haben dabei im Rhythmus eines Metronoms Zielbewegungen mit und ohne Sehen auszuführen. Durch den Takt des Metronoms wird die Bewegungszeit variiert. K e e l e & P o s n e r (1968) zeigten, daß bei Bewegungszeiten unter 250 Millisekunden die Zielgenauigkeit bei Bewegungen mit Sehen nicht mehr größer ist als bei Bewegungen ohne Sehen. Diese Zeit wird von C h r i-

s t i n a (1968) als "minimale Verarbeitungszeit" für visuelle Rückmeldungen betrachtet, da bei Bewegungszeiten unterhalb dieses Wertes das Sehen nicht mehr zu einer erhöhten Zielgenauigkeit führt.

Die mit dieser Versuchsanordnung gewonnene Schätzung der bei der Verarbeitung visueller Rückmeldungen auftretenden Verzögerungen ist m.E. zu groß. Wenn die Zeit von 250 Millisekunden als Verzögerungszeit angenommen wird, impliziert das die Annahme, daß bereits die unmittelbar nach Bewegungsbeginn auftretenden Rückmeldungen die Zielgenauigkeit verbessern. Das scheint mir jedoch unglaubwürdig. Für die Zielgenauigkeit kritische Rückmeldungen dürften vielmehr erst kurz vor Bewegungsende, also in der Nähe des Ziels, auftreten. Auch dann, wenn die Verzögerungszeiten viel kleiner als 250 Millisekunden sind, sollte unter dieser Bedingung bei Bewegungszeiten von weniger als 250 Millisekunden das Sehen die Zielgenauigkeit nicht mehr verbessern. Die letzten Rückmeldungen, die noch verarbeitet werden können, dürften bei dieser kurzen Bewegungszeit nämlich von zu weit vom Ziel entfernt liegenden Gliederpositionen stammen.

Entsprechende Experimente zur Schätzung der bei der Verarbeitung propriozeptiver Rückmeldungen auftretenden Verzögerungen liegen nicht vor. Auch hier spricht aber einiges dafür, daß die Verzögerungszeiten wesentlich kleiner sind als die Reaktionszeiten. A d a m s (1976) gelangt nach einer Übersicht über die Ergebnisse physiologischer Arbeiten, in denen die Leistungzeiten zwischen verschiedenen peripheren und zentralen Bereichen des Nervensystems untersucht werden (z.B. von den extraocularen Muskeln zum Kleinhirn), zu Schätzungen der Verzögerung, die im Bereich von wenigen Dutzend Millisekunden liegen.

Nach diesen Überlegungen scheint das Argument, daß die Verzögerungen bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen zu lang seien, als daß die Bewegungen auf der

Grundlage dieser Rückmeldungen kontinuierlich geregelt werden könnten, nicht unbedingt zuzutreffen.

Zielanpassung ablaufender Bewegungen: Ein experimenteller Ansatz, der zeigen soll, daß die peripheren Rückmeldungen nicht kontinuierlich ausgewertet werden, geht von folgender Überlegung aus: Wenn bei Zielbewegungen die Rückmeldungen kontinuierlich ausgewertet werden, sollten die Bewegungen das Ziel stets bis auf zufällige Abweichungen genau erreichen. Wenn jedoch während einer gewissen Zeit vor dem Ende der Bewegung die Rückmeldungen nicht mehr ausgewertet werden, sollte die Zielgenauigkeit davon abhängen, wie groß der in dieser Zeit zurückgelegte Weg ist (H o w a r t h u.a., 1971). Rückmeldungen sollten nämlich umso weniger für ein genaues Erreichen des Ziels wesentlich sein, je weiter die Glieder-Position, von der die Rückmeldungen stammen, von der Zielposition der Bewegung entfernt ist.

Einen nach dieser Überlegung zu erwartenden systematischen Zusammenhang zwischen Bewegungsweite und Zielgenauigkeit fanden H o w a r t h u.a. (1971). Ihre Vpn hatten im Takt eines Metronoms Zielbewegungen von etwa 50 Zentimeter Weite auszuführen; durch den Takt des Metronoms wurde die Bewegungszeit variiert. Analysiert wurde die Beziehung zwischen der in den letzten 290 Millisekunden der Bewegung zurückgelegten Distanz - sie variiert mit der Bewegungszeit - und der Zielgenauigkeit. H o w a r t h u.a. fanden eine lineare Beziehung mit einer Steigung größer als Null zwischen dem Quadrat der Distanz und der Varianz der Bewegungsendpunkte um das Ziel. Dasselbe Ergebnis fanden B e g g s & H o w a r t h (1972) auch dann, wenn die Bewegung während der letzten 290 Millisekunden nicht gesehen werden konnte. B e g g s u.a. (1972) fanden ebenfalls eine lineare Beziehung zwischen dem Quadrat der gesamten Bewegungsweite und der Zielgenauigkeit, wenn die visuelle Rückmeldung während der ganzen Bewegung ausgeblendet war.

B e g g s, H o w a r t h und Mitarbeiter interpretieren ihre Ergebnisse nur im Hinblick auf die fehlende Auswertung exterozeptiver Rückmeldungen; ihr Argument trifft jedoch auch auf propriozeptive Rückmeldungen zu. In diesem allgemeineren Sinne interpretiert S c h m i d t (1969, 1972) seine Experimente, denen im Prinzip dasselbe Rational zugrundliegt wie denen von B e g g s, H o w a r t h und Mitarbeitern.

Die von S c h m i d t verwendete Versuchsanordnung besteht aus zwei horizontal angeordneten senkrecht aufeinander stehenden und sich kreuzenden Bahnen. Auf der einen Bahn läuft eine durch einen Motor bewegte Zielmarke, auf der anderen läuft ein Schieber, den die Vp an einem Griff anfassen und bewegen kann. Zu Beginn jedes Versuchsdurchgangs stehen die Zielmarke und der Schieber in bestimmten Entfernungen vom Kreuzungspunkt der Bahnen. Dann bewegt sich die Zielmarke auf die Kreuzung zu. Die Vp muß nun den Schieber so bewegen, daß sie die Zielmarke am Kreuzungspunkt trifft. Die Bewegungszeit ist ihr in einem groben Rahmen vorgegeben. Sie muß also den Startzeitpunkt für ihre Bewegung so auswählen, daß sie bei möglichst genauem Einhalten der Bewegungszeit die Kreuzung zum selben Zeitpunkt erreicht wie die Zielmarke.

Die abhängigen Variablen in diesem Versuch sind die Bewegungszeit, der Fehler und die Startzeit. Der Fehler ist die Differenz zwischen den Zeitpunkten, zu denen die Zielmarke und der von der Vp bewegte Schieber den Kreuzungspunkt der Bahnen erreichen. Die Startzeit ist die Differenz von Bewegungszeit und Fehler, also die Zeit vom Beginn der Bewegung bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die Zielmarke die Kreuzung erreicht.

Wenn in dieser Situation die Rückmeldungen ausgewertet werden und die ablaufende Bewegung entsprechend schneller oder langsamer aufgeführt wird, sollte die Zielmarke stets an der Kreuzung getroffen werden; allenfalls zufällige Fehler dürften auftreten. Wenn jedoch der Bewegungsverlauf

und so auch die Bewegungszeit nicht auf der Grundlage von Rückmeldungen modifiziert wird, sollte der Fehler von der Startzeit abhängen. S c h m i d t (1972) und S c h m i d t & R u s s e l l (1972) verwenden daher die über eine Folge von Bewegungen berechnete Korrelation zwischen Startzeit und Fehler als Index für das Ausmaß, in dem die Bewegung durch die Auswertung peripherer Rückmeldungen beeinflußt wird. Zumindest dann, wenn sehr kurze Bewegungszeiten (etwa 200 Millisekunden) von den Vpn gefordert werden, hat diese Korrelation einen recht hohen Wert (ca. 0.6 - 0.9).

S c h m i d t (1972) bezeichnet die Korrelation zwischen Startzeit und Fehler als "Index of Preprogramming". Die Größe dieser Korrelation soll das "Ausmaß der Vorprogrammierung" angeben; unter "Ausmaß der Vorprogrammierung" scheint mir am ehesten das Gegenteil von dem Ausmaß zu verstehen zu sein, in dem die ablaufende Bewegung aufgrund von Rückmeldungen modifiziert wird. Die Korrelation hängt jedoch nicht nur davon ab, wie stark die ablaufende Bewegung modifiziert wird, sondern auch von den Varianzen der abhängigen Variablen. Bezeichnet man die Startzeit mit s, die Bewegungszeit mit m und den Fehler mit e=s-m, so erhält man für die Korrelation r_{se}:

$$r_{se} = (s_s^2+s_e^2-s_m^2)\ (2s_s s_e)^{-1}$$

Diese Korrelation wird dann gleich Eins, wenn die Varianz der Bewegungszeiten s_m^2 gleich Null ist. Wegen $s_m^2=s_s^2+s_e^2-2r_{se}s_s s_e$ gilt dann $s_s^2=s_e^2$ und $r_{se}=1$.

Aus einer Varianz der Bewegungszeiten von Null folgt, daß die Bewegungszeit während einer Bewegung nicht modifiziert wird. Umgekehrt ist aber nicht immer dann, wenn eine solche Modifikation nicht stattfindet, eine Varianz der Bewegungszeiten von Null zu erwarten. Die Bewegungszeiten dürften nämlich auch dann variieren, wenn die Bewegungen nicht aufgrund von Rückmeldungen modifiziert werden. Daher ist eine Interpretation der Korrelation zwischen Startzeit und Fehler als "Ausmaß der Vorprogrammierung" nicht gerechtfertigt.

Wieweit die besprochenen Ergebnisse von B e g g s, H o w a r t h und Mitarbeitern und von S c h m i d t tatsächlich dafür sprechen, daß kurze Bewegungen bzw. kurze Abschnitte längerer Bewegungen ohne Auswertung

peripherer Rückmeldungen ablaufen, ist schwer zu beurteilen. Bedenken gegen diese Interpretation haben vor allem zwei Ursachen:

1) In den beschriebenen Experimenten wird die Verarbeitung von peripheren Rückmeldungen indirekt erfaßt, nämlich über das Ausmaß, in dem die Zielbewegungen während ihres Ablaufs modifiziert werden, so daß das Ziel genau erreicht wird. Erfaßt wird also eher die Verhaltenswirksamkeit der Rückmeldungen. Bei den verwendeten Armbewegungen ist es möglich, daß die Rückmeldungen zwar verarbeitet werden, aber wegen der Trägheit des bewegten Arms in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit nicht mehr zu einem genauen Erreichen des Bewegungsziels führen können. Die Ergebnisse wären dann nicht darauf zurückzuführen, daß die peripheren Rückmeldungen nicht verarbeitet werden, sondern darauf, daß die verarbeiteten Rückmeldungen nicht mehr verhaltenswirksam werden.
2) In den beschriebenen Experimenten wird nur der jeweils letzte Abschnitt von Zielbewegungen betrachtet. Wenn man relativ lange Verzögerungen bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen annimmt, können die Ergebnisse auch darauf zurückzuführen sein, daß die letzten noch auswertbaren Rückmeldungen von Gliederpositionen stammen, die unterschiedlich weit von der Zielposition entfernt liegen. Die Ergebnisse wären unter diesen Bedingungen auch dann zu erwarten, wenn die Rückmeldungen kontinuierlich ausgewertet würden. Gegen eine solche Interpretation der Ergebnisse sprechen allerdings die im letzten Abschnitt besprochenen Argumente, nach denen die Verzögerungen bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen möglicherweise sehr kurz sind.

Auch dieser experimentelle Ansatz spricht folglich, ebenso wie das auf den Verzögerungen bei der Verarbeitung peripherer Rückmeldungen beruhende Argument, nicht eindeutig dafür, daß vorhandene periphere Rückmeldungen

nicht kontinuierlich ausgewertet werden. Eindeutigere Ergebnisse in Bezug auf das erste der beiden von K e e l e (1968) genannten Kriterien für Bewegungsprogramme liefern jedoch Experimente, die zeigen sollen, daß Bewegungen auch nach Ausschaltung der peripheren Rückmeldungen noch möglich sind. Diese sollen in den folgenden Abschnitten besprochen werden.

Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen bei Menschen: Die Ausblendung exterozeptiver Rückmeldungen ist auf sehr einfache Art möglich und wurde in zahlreichen Tracking-Experimenten durchgeführt; eine Übersicht über solche Experimente gibt P o u l t o n (1973a, Kap. 12). Wesentlich schwieriger ist die Ausblendung der propriozeptiven Rückmeldungen. Eine reversible Ausschaltung aller propriozeptiven Afferenzen ist bisher nicht möglich: Entweder werden, wie in den Versuchen von L a s z l o und Mitarbeitern (L a s z l o, 1966; L a s z l o u.a., 1970; L a s z l o & B a i r s t o w, 1971a, b; L a s z l o & B a g u l e y, 1971; L a s z l o & M a n n i n g, 1970; L a s z l o & B a k e r, 1971) auch die efferenten Nerven beeinträchtigt (K e l s o u.a., 1974, 1975), oder die Afferenzen von den in den Muskeln gelegenen Propriozeptoren werden nicht mit ausgeschaltet wie bei M e r t o n (1964) und B r o w n u.a. (1954). Die wohl einzige Untersuchung willkürlicher Bewegungen ohne alle peripheren Rückmeldungen mit Menschen ist die klassische Fallstudie von L a s h l e y (1917).

L a s h l e ys (1917) Vp war ein Mann mit einer Schußverletzung des Rückenmarks, die unter anderem eine völlige sensorische Unempfindlichkeit des linken Kniegelenks zur Folge hatte. Da bei diesem Gelenk auch der Patellarsehnenreflex fehlte, dürften auch die Muskelspindeln ausgeschaltet gewesen sein.

Das in diesem Zusammenhang wichtigste Ergebnis von L a s h l e y ist, daß die Vp aktive Bewegungen vorgegebener Richtung und Weite trotz Fehlens aller propriozep-

tiven und exterozeptiven Rückmeldungen ausführen konnte. Es waren auch langsame Bewegungen des Unterschenkels möglich, bei denen die vorgegebene Weite durch mehrere erkennbare Muskelkontraktionen erreicht wurde. Diese Leistungen der Vp können nicht darauf zurückgeführt werden, daß sie ihre Oberschenkel-Muskeln jeweils für eine bestimmte Zeit kontrahierte und so eine vorgegebene Weite erreichte, denn dazu variierten die Bewegungszeiten bei gleicher Bewegungsweite zu stark.

Passive Bewegungen des Unterschenkels wurden dagegen von der Vp nicht bemerkt. Auch äußere Kräfte, die auf das aktiv bewegte Glied einwirkten, konnte sie nicht kompensieren: die Vp erlebte dann zum Beispiel eine Bewegung des Unterschenkels in eine bestimmte Richtung, während er tatsächlich in die entgegengesetzte Richtung bewegt wurde.

Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen bei Tieren: Bei Tieren ist eine operative Ausschaltung der Propriozeption möglich. Bei Wirbeltieren werden in der Regel die Hinterhornwurzeln durchtrennt (Deafferentierung). Als typisches Ergebnis dieser Operation galt lange Zeit das völlige Fehlen von Bewegungen mit den deafferentierten Gliedmaßen. In den letzten Jahren zeigte sich jedoch, daß Bewegungen deafferentierter Gliedmaßen konditioniert werden können, und daß ein deafferentiertes Glied auch dann bewegt wird, wenn das kontralaterale Glied ebenfalls deafferentiert ist oder durch eine Zwangsjacke in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt (K n a p p u.a., 1963; B e r m a n & T a u b, 1966; T a u b & B e r m a n, 1968; B e r m a n u.a., 1968; B e r m a n u.a., 1971).

Zur Begründung der Aussage, daß Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen möglich sind, wird bisweilen auf Experimente mit niederen Tieren (Insekten, Krebse, Vögel) zurückgegriffen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse solcher Experimente auf menschliche Bewegungen wird zu Recht bezweifelt, da bei diesen Tieren angeborene Bewegungsmuster

eine wesentlich größere Rolle spielen als bei Menschen (K e e l e, 1976; K e e l e & S u m m e r s, 1976). Bei Experimenten mit Affen sind Zweifel an der Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse auf menschliche Bewegungen jedoch in viel geringerem Maße gerechtfertigt. Daher möchte ich mich hier auf zwei Experimente mit Affen beschränken, in denen einfache Bewegungen ohne Exterozeption und Propriozeption untersucht wurden.

T a u b (1968) berichtet von einem Experiment, in dem Affen mit dem deafferentierten Glied Zielbewegungen auszuführen hatten; die Genauigkeit der Zielbewegungen wurde durch korrelierte Bekräftigungen aufrechterhalten. Für jede Bewegung wurde eins von drei möglichen Zielen zufällig ausgewählt. Die Fragestellung des Experiments betraf die Prismen-Adaptation deafferentierter und gesunder Tiere; über die Genauigkeit der Zielbewegungen macht T a u b daher nur recht allgemeine Angaben: Sie sei bei deafferentierten Tieren überraschend groß gewesen und entsprach an guten Tagen etwa der Zielgenauigkeit gesunder Tiere an mittelmäßigen.

Das zweite Experiment wurde von V a u g h a n u.a. (1970) durchgeführt: vier Rhesusaffen lernten, durch Bewegungen des Handgelenks in regelmäßigen Abständen einen Schalter zu bedienen. Während der Bewegungen wurden das Elektromyogramm und die Hirnrindenpotentiale im Projektionsgebiet der Hand im präzentralen motorischen Kortex registriert. Nach der Deafferentierung wurden einige Übungssitzungen durchgeführt, bis der Bewegungsverlauf keine offensichtlichen Unterschiede zum Bewegungsverlauf vor der Deafferentierung mehr zeigte. Die dann abgeleiteten Hirnrindenpotentiale glichen hinsichtlich ihrer Form den vor der Deafferentierung gefundenen. Die Bewegungen verliefen nach der Deafferentierung jedoch langsamer (ca. 500 Millisekunden statt 200 bis 300 Millisekunden Dauer), und die Zeit vom Beginn der kortikalen Aktivität bis zum Einsetzen der Muskelpotentiale war verlängert (250 bis 500 Millisekunden statt 80 bis 250).

Zur Bewertung der Deafferentierungs-Experimente: Die Deafferentierungs-Experimente zeigen, daß Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen möglich sind. Gegen diese Folgerung werden jedoch verschiedene Einwände vorgebracht. Ein erster Einwand, daß die operative Ausschaltung der Propriozeption unvollständig ist, wird von K e e l e & S u m m e r s (1976) zurückgewiesen, ebenso von A d a m s (1976).

Ein zweiter Einwand wird von A d a m s (1976) genannt: Das deafferentierte Tier könnte mit einem noch vollständig innervierten Körperglied Bewegungen ausführen, die mit den Bewegungen des deafferentierten Gliedes korreliert sind; durch die propriozeptiven Rückmeldungen vom intakten Glied erhielte das Tier dann indirekt Rückmeldungen über die Bewegung des deafferentierten Gliedes. Nach einem Ergebnis von T a u b (1968) trifft dieser Einwand jedoch nicht zu. Der Gebrauch der vorderen deafferentierten Gliedmaßen zeigte nämlich keine Beeinträchtigung, nachdem in einer zweiten Operation auch die bisher intakten Hinterhornwurzeln durchtrennt worden waren. Hätten die Bewegungen der vorderen Gliedmaßen auf Rückmeldungen von korrelierten Bewegungen anderer Körperteile beruht, hätten sie dagegen nach der vollständigen Deafferentierung nicht mehr auftreten dürfen.

Ein dritter Einwand geht davon aus, daß die Motorik bei den deafferentierten Tieren im Vergleich zu gesunden Tieren etwas beeinträchtigt ist. K e e l e & S u m m e r s (1976) schließen daher nicht aus, daß vor allem an den fein abgestuften Bewegungen der distalen Muskulatur Regelvorgänge beteiligt sind, deren Fehlen zu dieser Beeinträchtigung führt.

Wie bereits anfangs gesagt wurde, kann gar nicht bestritten werden, daß Regelvorgänge an willkürlichen Bewegungen beteiligt sind: alle umfassenderen Theorien, die Bewegungsprogramme postulieren, nehmen ein Zusammenwirken von Regelung und Programm-Steuerung an (z.B. C r a i k,

1947, 1948; C h a s e, 1965a, b; K e e l e, 1976; S c h m i d t, 1975). Ohne Regelvorgänge wäre eine Anpassung der Bewegungen an veränderte Umweltbedingungen nicht möglich. Programm-Steuerung wird daher stets nur für Bewegungsabschnitte relativ kurzer Dauer angenommen; in festen Zeitintervallen oder jeweils dann, wenn Abweichungen der Gliederposition von der Soll-Position zu groß werden, soll das laufende Bewegungsprogramm auf der Grundlage der Rückmeldungen modifiziert werden oder ein anderes Programm gestartet. Da diese auch bei Annahme einer Programm-Steuerung notwendigen Korrekturen durch periphere Rückmeldungen in den beschriebenen Experimenten fehlen, ist eine Beeinträchtigung der Bewegungen auf jeden Fall zu erwarten. Daß die Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen jedoch überhaupt möglich sind, weist darauf hin, daß willkürliche Bewegungen nicht ausschließlich geregelt werden, sondern daß Prozesse an ihrer Kontrolle beteiligt sind, die ohne periphere Rückmeldungen arbeiten.

V a u g h a n u.a. (1970) nennen noch einen weiteren Faktor, der die Bewegungskoordination deafferentierter Tiere beeinträchtigen dürfte. Bei diesen Tieren ist das Erregungsniveau der Alpha-Motoneurone wegen der fehlenden Spindel-Afferenzen reduziert. Gleiche motorische Kommandos supraspinaler Zentren bewirken daher vor und nach der Deafferentierung verschiedene Muskelkontraktionen. Allgemeiner läßt sich diese Ursache einer motorischen Beeinträchtigung nach der Deafferentierung folgendermaßen beschreiben: Die spinalen Reflexe können als "Bausteine" oder "Unterprogramme" willkürlicher Bewegungen betrachtet werden, deren Aktivität durch die motorischen Kommandos höherer Zentren moduliert wird (H a y e s & M a r t e n i u k, 1976). Die motorischen Kommandos für eine bestimmte Bewegung müssen daher so sein, daß der Beitrag spinaler Reflexe zu den Muskelkontraktionen berücksichtigt wird. Diese spinalen Reflexe fehlen jedoch nach der Deafferentierung.

Als viertes schließlich ist der Einwand möglich, daß deafferentierte Tiere zwar Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen ausführen können, dieses Ergebnis aber nicht auf gesunde Tiere übertragen werden kann. Nach der Deaffe-

rentierung könnte etwa eine grundlegende Änderung in der Funktionsweise des Zentralnervensystems stattfinden, entsprechend der Kompensation von Ausfällen einzelner Hirnregionen, deren Leistungen von anderen Teilen des Zentralnervensystems übernommen werden. Eine solche Umstellung in der Funktionsweise könnte beispielsweise erklären, daß vor der Deafferentierung gelernte Bewegungen hinterher über längere Zeit geübt werden müssen, bis sie wieder beherrscht werden (V a u g h a n u.a., 1970; K n a p p u.a., 1963).

Wenn eine solche Funktionsänderung nach der Deafferentierung stattfinden würde, sollte die motorische Beeinträchtigung umso geringer sein, je jünger die Tiere bei der Deafferentierung sind, denn Läsionen des Zentralnervensystems können generell umso besser kompensiert werden, je früher sie auftreten (siehe U l l m a n n, 1974, S. 217-218). Nach Ergebnissen von B e r m a n & B e r m a n (1973) mit im Uterus des Muttertieres deafferentierten Jungtieren ist jedoch das Gegenteil der Fall. Bestimmte motorische Leistungen, die ausgewachsen deafferentierte Tiere auch nach der Operation beherrschen, wurden von den bei der Geburt deafferentierten Tieren nicht gelernt. Auch dieser vierte Einwand gegen die Folgerung aus den Deafferentierungs-Experimenten, daß Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen ausgeführt werden können, ist somit nicht haltbar.

Kontrolle von Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen: Nach den in diesem Kapitel dargestellten Überlegungen und Experimenten kann das erste der beiden von K e e l e (1968) genannten Kriterien für Bewegungsprogramme als erfüllt gelten: Bewegungen können ohne alle peripheren Rückmeldungen ausgeführt werden, und es scheint zumindest nicht völlig unwahrscheinlich, daß auch dann, wenn periphere Rückmeldungen vorhanden sind, sie nicht kontinuierlich für die Kontrolle des Bewegungsverlaufs ausgewertet werden.

Zumindest kürzere Zeitabschnitte im Bewegungsverlauf werden folglich nicht geregelt, sondern gesteuert.

Einige Autoren, zum Beispiel S c h m i d t (1975) und R u s s e l l (1976), betrachten dieses erste Kriterium als ausreichend für die Annahme von Bewegungsprogrammen: Wenn gezeigt werden kann, daß sich gesteuerte Abschnitte im Bewegungsverlauf finden, sei damit auch der Nachweis von Bewegungsprogrammen geführt. Diese Auffassung ist jedoch unzutreffend, wie Adams (1976) betont. Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen können nämlich auch auf andere Art zustandekommen als durch Bewegungsprogramme.

Warum sollte eine Bewegung ohne periphere Rückmeldungen eigentlich durch ein Programm gesteuert werden? Im Fall einer Programm-Steuerung wird der Vorlage ein Bewegungsprogramm zugeordnet, das die motorischen Kommandos für eine ganze Bewegung oder einen Abschnitt einer längeren Bewegung bereitstellt. Wäre es nicht einfacher, wenn die motorischen Kommandos direkt aus der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls gewonnen würden? In diesem Fall, den ich hier als "direkte Steuerung" bezeichnen möchte, würden jeder durch die Vorlage geforderten momentanen Positionsänderung eines Körpergliedes unmittelbar die motorischen Kommandos zugeordnet, die eine solche Positionsänderung bewirken. Das entspricht der Funktionsweise eines einfachen technischen Übertragungselementes mit einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße und etwa einer linearen Differentialgleichung, die die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal angibt.

Neben einer Programm-Steuerung und einer direkten Steuerung kommt noch ein dritter Mechanismus in Frage, durch den ebenfalls das Zustandekommen von Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen erklärt werden kann. Dabei handelt es sich um eine zentrale Regelung. Die Möglichkeit zentraler Regelvorgänge wird zum Beispiel von T a u b & B e r m a n (1968) erwähnt und vor allem

im Zusammenhang mit Untersuchungen über Korrekturen falscher Bewegungen diskutiert (G i b b s, 1965; R a b b i t t, 1966, 1967; H i g g i n s & A n g e l, 1970; A n g e l u.a., 1971; M e g a w, 1972b; S c h m i d t, 1976).

Bei einer zentralen Regelung sollen die motorischen Kommandos selbst mit der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls verglichen werden. Die zentralen Rückmeldungen erfordern keine peripheren Rezeptoren und können so mit allenfalls minimalen Verzögerungen verarbeitet werden. Nach K e l s o & S t e l m a c h (1976) spielt das Cerebellum bei solchen zentralen Regelkreisen eine bedeutsame Rolle, indem es bereits vor Eintreffen peripherer Rückmeldungen die aus den motorischen Kommandos resultierende Bewegung berechnet und damit einen Vergleich der motorischen Kommandos mit der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls erst möglich macht.

Die Tatsache, daß Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen möglich sind, kann nach diesen Überlegungen nicht nur als Argument für eine Programm-Steuerung angeführt werden, sondern mit der gleichen Berechtigung auch für die Annahme einer zentralen Regelung oder direkten Steuerung. In diesem Zusammenhang ist es belanglos, ob es eine zentrale Regelung oder direkte Steuerung gibt, oder ob diese Funktionsweisen beide möglich sind oder auch etwa zusammen mit einer Programm-Steuerung vorkommen. Wesentlich ist vielmehr, daß zum Nachweis von Bewegungsprogrammen mehr erforderlich ist, als Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen zu zeigen. Dieses notwendige "Mehr" soll in den folgenden Kapiteln besprochen werden.

Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn

Von einem Bewegungsprogramm kann dann gesprochen werden, wenn zusätzlich zum ersten auch das zweite von K e e l e (1968) genannte Kriterium als erfüllt betrachtet werden kann: Es muß gezeigt werden, daß die motorischen Kommandos für eine Bewegung bereits vor ihrem Beginn bereitgestellt werden. Sowohl bei zentraler Regelung wie auch bei direkter Steuerung sollte das nämlich nicht der Fall sein, sondern nur bei einer Programm-Steuerung. In der Literatur finden sich zwei verschiedene Ansätze, die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn zu demonstrieren.

Bewegungskomplexität und Reaktionszeit: Der erste der beiden Ansätze geht auf H e n r y & R o g e r s (1960) zurück: Je komplexer eine auszuführende Bewegung ist, desto komplexer sollte auch das vor Bewegungsbeginn bereitzustellende Programm sein, und desto größer folglich die Reaktionszeit. Die vorliegenden Untersuchungen über den Zusammenhang von Bewegungskomplexität und Reaktionszeit bieten ein recht unübersichtliches Bild; nur in der Minderzahl der Experimente tritt der postulierte Zusammenhang tatsächlich auf.

Die Reaktionszeit wird nicht dadurch beeinflußt, daß mit der Bewegung unterschiedlich große Gewichte gehoben werden müssen (G l e n c r o s s, 1973); sie wird auch dann nicht verlängert, wenn eine Bewegung zusätzlich eine Richtungsumkehr besitzt (G l e n c r o s s, 1972a, 1973). Ebenso hat die Bewegungsweite keinen Einfluß (K l a p p, 1975; S e a r l e & T a y l o r, 1948; B r o w n & S l a t e r - H a m m e l, 1949; G l e n c r o s s, 1972a; L a g a s s e & H a y e s, 1973), und zwar sowohl dann, wenn ein Ziel genau getroffen werden muß, wie auch dann, wenn die Bewegungsweiten nur in grobem Rahmen vorgegeben sind. Wenn dagegen, wie zum Beispiel bei H e n r y & R o g e r s (1960), die Bewegungsweite mit der geforderten Bewegungsgenauigkeit kontaminiert ist, zum Beispiel das Heben eines Fingers mit einer weiteren Bewegung zu einem Ziel verglichen wird, ist die Reaktionszeit bei der weiteren Bewegung größer.

Im Gegensatz zur überwiegenden Zahl der Arbeiten berichten F i t t s & P e t e r s o n (1964) einen Anstieg der Reaktionszeit mit der Bewegungsweite sowie mit der geforderten Zielgenauigkeit; letzterer war jedoch nicht signifikant. Ein Anstieg der Reaktionszeit mit der Zielgenauigkeit wird auch von K l a p p (1975) berichtet; er fand sich allerdings nur bei Bewegungen geringer Weite. K l a p p u.a. (1974) fanden Reaktionszeitunterschiede beim Drücken der Morse-Codes "." und "-" in einer Wahlsituation, jedoch nicht bei der einfachen Reaktionszeit. (Im letzteren Fall weiß die Vp bereits vor dem Startsignal, welche Bewegung sie durchführen muß). Ebenfalls in einer Wahlsituation fand A m e l a n g (1966) vor dem Zeichnen einer Wellenlinie eine längere Reaktionszeit als vor dem Zeichnen einer Geraden. Relativ konsistent steigt die Reaktionszeit, wenn mit einer Bewegung nicht nur ein Ziel zu erreichen ist, sondern mehrere Ziele getroffen werden müssen (H e n r y & R o g e r s, 1960; G l e n n c r o s s, 1972a); G r i e w (1959) fand einen solchen Zusammenhang nur bei älteren Vpn (50 - 57 Jahre), nicht aber bei jüngeren (20 - 26 Jahre).

Nach H a y e s & M a r t e n i u k (1976) ist unklar, was die Komplexität einer Bewegung ausmacht. Insofern können die Experimente, in denen kein Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Charakteristika der auszuführenden Bewegung gefunden wurde, nicht gegen die Hypothese von H e n r y & R o g e r s (1960) ins Feld geführt werden: es kann sein, daß diese Bewegungscharakteristika nicht in der Komplexität zugrundeliegender Bewegungsprogramme reflektiert werden.

Die Experimente, die einen Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Bewegungskomplexität zeigen, können jedoch auch anders interpretiert werden als durch die Annahme, daß die Bereitstellung unterschiedlich komplexer Bewegungsprogramme unterschiedlich lange Zeit erfordert. Auf eine solche alternative Interpretation wird von K l a p p u.a. (1974) hingewiesen: Bevor die Bewegung beginnen kann, muß das Bewegungs-Soll intern repräsentiert sein; K l a p p u.a. sprechen von der "Erzeugung eines sensorischen oder propriozeptiven Bildes der Reaktion vor deren Beginn", die unterschiedlich lange dauern kann.

In den meisten der Versuche, in denen ein Zusammen-

hang von Bewegungskomplexität und Reaktionszeit gefunden wird, muß das Bewegungs-Soll zunächst wahrgenommen werden. Bis auf diese Weise eine innere Repräsentation des Bewegungs-Solls entstanden ist, vergeht eine gewisse Zeit. Diese Zeit sollte umso größer sein, je komplizierter die wahrzunehmende Vorlage für die Bewegung ist. Wenn beispielsweise unterschiedlich viele Zielpunkte wahrgenommen werden müssen, sollte die Reaktionszeit bei einer größeren Zahl von Zielpunkten schon allein deshalb länger sein, weil für deren genaue Lokalisation eine größere Zahl von Augenbewegungen nötig ist.

In einigen Versuchen, in denen ein Zusammenhang von Bewegungskomplexität und Reaktionszeit gefunden wurde, mag auch von Bedeutung sein, daß die verschiedenen Bewegungen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausgeführt werden (z.B. K l a p p u.a., 1974; wahrscheinlich auch A m e l a n g, 1966). Es mag sein, daß die Geschwindigkeit der Bewegungen gewissermaßen auf die Reaktionszeiten "abfärbt", indem bei langsameren Bewegungen auch die Reaktionszeiten länger sind. Das dürfte unter anderem deshalb der Fall sein, weil die Reaktionszeiten in der Regel erst dann als beendet gelten, wenn bereits initiale Muskelkontraktionen für die Ausführung der Bewegung stattgefunden haben; da bei schnelleren Bewegungen auch die Muskelkräfte schneller ansteigen sollten, könnte aus diesem Grund eine kürzere Reaktionszeit gemessen werden.

Diese Überlegungen machen deutlich, daß die Untersuchung des Zusammenhanges von Reaktionszeit und Bewegungskomplexität prinzipiell ungeeignet ist, das zweite von K e e l e (1968) genannte Kriterium für Bewegungsprogramme zu prüfen. Immer dann nämlich, wenn unterschiedliche Bewegungen zu verschiedenen Reaktionszeiten führen, kann dieses Ergebnis nicht nur durch die Annahme interpretiert werden, daß unterschiedlich komplexe Bewegungsprogramme bereitgestellt werden müssen, sondern auch dadurch, daß die Bewegungen unterschiedlich komplexe innere Repräsentationen des Bewegungs-Solls erfordern; Bewegungsprogramm und innere Repräsentation des Bewegungs-Solls sind bei dieser Versuchsanordnung nicht zu trennen.

Reproduktion aktiver und passiver Zielbewegungen:
Der zweite Ansatz, die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Beginn einer Bewegung zu zeigen, geht in erster Linie auf J o n e s (1972) zurück. Der theoretische Zusammenhang der Arbeiten von J o n e s (1972, 1973, 1974a, b) ist etwas allgemeiner, schließt aber die Frage nach Bewegungsprogrammen ein. Daher möchte ich die im folgenden zu beschreibenden Experimente etwas spezieller in Bezug auf die hier behandelte Frage interpretieren als J o n e s selbst es macht.

J o n e s vertritt eine streng zentralistische Auffassung, nach der peripheren Rückmeldungen nahezu jede Bedeutung bei der Kontrolle des Verlaufs willkürlicher Bewegungen abgeschrieben wird. Als wesentlich wird vielmehr die Überwachung von Efferenzen betrachtet; speziell sollen Bewegungen auch in Form von Efferenzkopien behalten werden. Was J o n e s unter einer Efferenzkopie versteht, scheint mir nicht ganz klar zu sein; auch die Beziehung zwischen Bewegungsprogrammen und Efferenzkopien erscheint mir undurchsichtig. (Die Ausführungen von S c h m i d t (1975, 1976) über den Begriff der Efferenzkopie bei J o n e s dürften nicht ganz zutreffen, wie ein Vergleich mit J o n e s (1974b, S. 38) zeigt: S c h m i d t geht davon aus, daß J o n e s den Begriff der Efferenzkopie im Sinne einer zentralen Rückkopplung verwendet; J o n e s selbst schreibt der Efferenzkopie jedoch auch den Charakter eines "motor memory storage system" zu.)

Der Versuch von J o n e s (1972, 1974b) umfaßt drei Versuchsbedingungen. In der ersten Bedingung bewegt die Vp einen Schieber auf einer geraden Bahn eine bestimmte Strecke bis an einen mechanischen Anschlag, in der zweiten Bedingung wird der Arm passiv bewegt, und in der dritten Bedingung macht die Vp eine aktive Bewegung selbst gewählter Weite. Die Augen der Vp sind verbunden, und die Variabilität der Bewegungsweiten unter den verschiedenen Versuchsbedingungen ist gleich. Nach kurzer Zeit muß die auf die drei unterschiedlichen Arten vorgegebene Bewegung aktiv reproduziert werden.

Wenn die Hypothese zutrifft, daß das Behalten moto-

rischer Kommandos für die Reproduktion maßgeblich ist, sollte die Reproduktion passiv vorgegebener Bewegungen ungenauer sein als die aktiver Bewegungen. Das trifft nach J o n e s (1972, 1974b) sowie nach P a i l l a r d & B r o u c h o n (1968) und M a r t e n i u k (1973) zu. Bei aktiven und passiven Bewegungen ist allerdings auch die Propriozeption verschieden, so daß die Unterschiede in der Reproduktionsgenauigkeit auch darauf zurückgeführt werden können.

Im Gegensatz zur freien aktiven Bewegung, bei der die Vp das Bewegungsziel selbst festlegt, können bei aktiven Bewegungen, die an einem mechanischen Anschlag enden, vor Beginn der Bewegung keine motorischen Kommandos bereitgestellt werden, die der Weite der Bewegung entsprechen. Sofern solche vor Bewegungsbeginn bereitgestellten motorischen Kommandos für das Behalten der Bewegung maßgeblich sind, sollte also eine freie aktive Bewegung genauer reproduziert werden als eine aktive Bewegung an einen Anschlag. Das ist nach J o n e s (1972, 1974b) der Fall, während zwischen der Reproduktionsgenauigkeit bei einer aktiven Bewegung an einen Anschlag und bei einer passiven Bewegung kein Unterschied besteht. Nach diesem Ergebnis sollten daher motorische Kommandos bereits vor Beginn der Bewegung bereitgestellt werden.

S t e l m a c h u.a. (1975) zeigten jedoch, daß diese Interpretation unzutreffend ist. Sie fanden zwar ebenfalls einen "Präselektions-Effekt" - freie aktive Bewegungen werden genauer reproduziert als aktive Bewegungen an einen Anschlag -, aber das bei einer veränderten Versuchsanordnung: die Startpositionen bei der Vorgabe der Bewegung und bei der Reproduktion waren verschieden, und die Vpn sollten nicht die Weite der Bewegung reproduzieren, sondern die Zielposition. Die Bewegung bei der Reproduktion muß dann eine andere Weite haben als die vorgegebene Bewegung, erfordert folglich auch andere motorische Kommandos. Das Behalten von vor Bewegungsbeginn bereitgestellten motorischen Kommandos kann demnach den Präselektions-Effekt nicht er-

klären; vielmehr scheinen die Vpn mehr über das Ziel zu "wissen", wenn sie es aktiv festlegen können als wenn es durch einen mechanischen Anschlag festgelegt wird (M a r t e n i u k, 1976). Eine solche Interpretation scheint deshalb naheliegend, weil bei der aktiven Bewegung an einen Anschlag das in der Umwelt vorgegebene Bewegungsziel nur propriozeptiv wahrgenommen werden kann; auf der Grundlage einer solchen wahrscheinlich nicht sehr genauen propriozeptiven Lokalisation des Zielpunktes sollte auch nur eine relativ ungenaue interne Repräsentation des Ziels möglich sein. Bei der freien aktiven Bewegung dagegen kann die Vp selbst die interne Repräsentation des Zielpunktes festlegen; sie sollte daher unter dieser Bedingung genauer sein.

Ebenso wie der erste Ansatz - die Untersuchung des Zusammenhanges von Bewegungskomplexität und Reaktionszeit - ist demnach auch dieser zweite Ansatz nicht in der Lage, die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn und damit das Zutreffen des zweiten von K e e l e (1968) genannten Kriteriums für Bewegungsprogramme zu zeigen.

Kann die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn überhaupt gezeigt werden?: Gegen die beiden beschriebenen Ansätze, die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn zu zeigen, wurde im Prinzip stets derselbe Einwand vorgebracht: In beiden Fällen wird nämlich argumentiert, daß für die gefundenen Unterschiede nicht Unterschiede zwischen den vor Bewegungsbeginn bereitgestellten motorischen Kommandos maßgeblich sind, sondern Unterschiede zwischen den inneren Repräsentationen des jeweiligen Bewegungs-Solls. Diese inneren Repräsentationen sollten entweder in unterschiedlich langer Zeit entwickelt werden oder aber die Zielposition für eine Bewegung mit unterschiedlicher Genauigkeit festlegen. Es scheint mir nur schwierig oder gar nicht möglich zu sein, in einem Experiment,

das die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn zeigen soll, eine solche alternative Interpretation auszuschließen.

Ein anderer Weg, das zweite Kriterium für Bewegungsprogramme zu prüfen, könnte von einer Folgerung aus der Annahme der Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn ausgehen. Da der Verlauf der Bewegung dabei in die Zukunft hinein festgelegt wird, sollte während des Ablaufs eines Bewegungsprogramms der Verlauf der Bewegung gut vorhersagbar sein; Bewegungen mit gleicher Vorlage, die während eines bestimmten Zeitabschnitts gleich verlaufen, sollten das also auch in einem späteren Zeitabschnitt tun, sofern sie noch durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert werden. Eine Vorhersage des Bewegungsverlaufs zu einem noch späteren Zeitpunkt, zu dem der Bewegung bereits ein anderes Programm (bzw. dasselbe Programm mit geänderten Parametern) zugrundeliegt, sollte dagegen nicht oder nur schlecht möglich sein. Aus der Annahme, daß die motorischen Kommandos jeweils für einen gewissen Abschnitt einer Bewegung im voraus bereitgestellt werden, ergibt sich demnach folgendes: Der Anfangsverlauf einer etwas länger dauernden Bewegung sollte zunächst eine relativ gute Vorhersage des weiteren Bewegungsverlaufs ermöglichen; von einem bestimmten Zeitpunkt an aber müßte die Vorhersagbarkeit relativ abrupt schlechter werden.

Ein solches Ergebnis ist jedoch auch dann zu erwarten, wenn eine zentrale Regelung oder eine direkte Steuerung vorliegt. Solange die Eigenschaften dieser Prozesse gleich bleiben, sollte die Vorhersagbarkeit des Bewegungsverlaufs gut sein. Sie sollte absinken, wenn sich die Eigenschaften des Prozesses, durch den die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls in motorische Kommandos umgesetzt wird, ändern. Sie sollte auch dann relativ abrupt schlechter werden, wenn die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls zu bestimmten Zeitpunkten an die in der Umwelt vorgegebene Vorlage angepaßt wird. Auch ein solcher Ansatz, die Bereitstellung moto-

rischer Kommandos vor Bewegungsbeginn zu zeigen, kann folglich nicht zu eindeutigen Ergebnissen führen.

Einige Autoren (z.B. H e n r y & H a r r i s o n, 1961; W i l l i a m s, 1970, 1971a, b) versuchen, vor Bewegungsbeginn bereitgestellte motorische Kommandos durch die Untersuchung der Umsteuerung von Bewegungen nachzuweisen. Diese Versuche basieren auf der Voraussetzung, daß die Ausführung solcher Kommandos durch exterozeptive Information nicht beeinflußt werden kann. Diese Voraussetzung trifft sicherlich nicht zu, denn auch für den Fall einer Programm-Steuerung ist, wie bereits begründet wurde, stets eine Überwachung durch Regelvorgänge anzunehmen und somit auch eine Modifizierbarkeit ablaufender Programme. Ergebnisse, nach denen Bewegungen nur mit großen Verzögerungen modifiziert werden können, sind zumeist auf andere Faktoren zurückzuführen wie etwa darauf, daß die Masse des bewegten Körpergliedes zwangsläufig solche Verzögerungen bewirkt.

Nach diesen Überlegungen ist es kaum oder gar nicht möglich, die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn zu zeigen. Ein Bewegungsprogramm im Sinne der Definition von K e e l e (1968) kann daher wahrscheinlich gar nicht nachgewiesen werden.

Klassen äquivalenter Bewegungen

Nach den Ausführungen des letzten Abschnitts ist es sinnvoll, nach einem anderen Kriterium als dem der vor Bewegungsbeginn bereitgestellten motorischen Kommandos zu suchen, das eine Abgrenzung einer Programm-Steuerung von anderen Prozessen, die ebenfalls ohne periphere Rückmeldungen auskommen, erlaubt. Ein solches anderes Kriterium ergibt sich aus der im ersten Kapitel beschriebenen Auffassung, daß jeweils Gruppen von Bewegungen durch dasselbe Programm gesteuert werden. Nach dieser Auffassung sollte es nämlich Klassen äquivalenter Bewegungen geben, die durch gemeinsame Bewegungsprogramme definiert sind. Bei anderen Prozessen ohne periphere Rückmeldungen, etwa direkter Steuerung oder zentraler Regelung, fehlt dagegen die Grundlage für eine solche Klassenbildung. Die Existenz "motorischer Äquivalenzen" - dieser Begriff wird von R o s e n-

b a u m (1977) verwendet - kann daher als Kriterium für die Berechtigung der Annahme von Bewegungsprogrammen gelten. Nach dieser Überlegung kann dann von einem Bewegungsprogramm gesprochen werden, wenn gezeigt werden kann, daß

1) willkürliche Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen möglich sind und
2) Klassen äquivalenter Bewegungen existieren.

Diese Definition eines Bewegungsprogramms steht nicht im Gegensatz zu der von K e e l e (1968). Es wird nicht behauptet, daß ein Bewegungsprogramm die motorischen Kommandos nicht vor Bewegungsbeginn bereitstellt; dieses Postulat ist vielmehr untrennbar mit dem Begriff des Programms verknüpft. Nur ist es ohne Nutzen, solange es nicht experimentell geprüft werden kann.

Wenn die Existenz äquivalenter Bewegungen als zweites Kriterium für Bewegungsprogramme verwendet wird, kann nicht mehr davon ausgegangen werden, daß jeder Bewegung ein eigenes Programm zugeordnet ist. Insofern ist die im folgenden verwendete Bewegungsprogramm-Definition enger als die von K e e l e (1968), die ja sowohl eine Eins-zu-Eins-Zuordnung zwischen Bewegungen und zugehörigen Programmen zuläßt wie auch eine Zuordnung der Programme jeweils zu Gruppen von Bewegungen.

Was unter "äquivalenten" Bewegungen zu verstehen ist, ist zunächst sehr unbestimmt. Der Begriff wird erst durch die Festlegung von empirischen Operationen genauer, mit deren Hilfe sich äquivalente und nicht äquivalente Bewegungen unterscheiden lassen sollten. Die Auswahl solcher empirischen Operationen und die Formulierung der bei ihnen zu erwartenden Ergebnisse muß sich aus dem Konzept des Bewegungsprogramms ergeben, da Bewegungsprogramme die Grundlage für die Äquivalenzen abgeben sollen. In der Literatur finden sich bisher zwei verschiedene Ansätze, die Annahme motorischer Äquivalenzen zu prüfen.

Reaktionszeit als Äquivalenzkriterium: Der erste Ansatz beruht auf folgender Überlegung, die auf M e g a w (1972a) zurückgeht: Bei einer Wahlreaktionsaufgabe mit zwei Reaktionsalternativen können die erforderlichen Bewegungen

entweder durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert werden (äquivalente Bewegungen) oder aber durch verschiedene (nicht äquivalente Bewegungen). Bei äquivalenten Bewegungen müssen jeweils nur unterschiedliche Parameter in ein stets gleiches Programm eingesetzt werden, bei nicht äquivalenten Bewegungen ist dagegen, bevor Parameter eingesetzt werden können, erst noch das der geforderten Bewegung zugeordnete Programm aufzurufen. Bei äquivalenten Bewegungen sollte die Wahlreaktionszeit daher kürzer sein als bei nicht äquivalenten.

Diese Überlegung verwendet M e g a w (1972a) für die Interpretation des folgenden Ergebnisses: In einer Zwei-Wahl-Situation waren die Reaktionsalternativen in der einen Bedingung zwei Bewegungen unterschiedlicher Weite in dieselbe Richtung, in einer anderen Bedingung aber zwei Bewegungen in entgegengesetzte Richtungen. Bei gleicher Unsicherheit hinsichtlich der als nächstes auszuführenden Bewegung war die Reaktionszeit in der ersten Bedingung (gleiche Richtung) kürzer als in der zweiten (verschiedene Richtungen). M e g a w nimmt nun an, daß Bewegungen in verschiedene Richtungen durch verschiedene Bewegungsprogramme gesteuert werden, Bewegungen unterschiedlicher Weite in dieselbe Richtung aber durch dasselbe Bewegungsprogramm.

Diese Interpretation scheint wenig plausibel. Aus ihr folgt nämlich, daß unendlich viele Bewegungsprogramme gespeichert sein müßten, da es im Prinzip unendlich viele verschiedene Bewegungsrichtungen gibt. Eine alternative Interpretation des Ergebnisses von M e g a w (1972a) liegt auf der Hand: Wenn nur die Weite der auszuführenden Bewegung unsicher ist, kann die Bewegung bereits begonnen werden, bevor die Entscheidung über das Bewegungsziel beendet ist (vgl. T r u m b o u.a., 1968; T r u m b o, 1970); wenn dagegen die Bewegungsrichtung unsicher ist, ist ein solcher vorzeitiger Bewegungsbeginn nicht möglich.

Gegen diese alternative Interpretation führt M e g a w

an, daß die Beschleunigungsverläufe bei Bewegungen mit unterschiedlichen Weiten sich bereits 25 Millisekunden nach Bewegungsbeginn voneinander unterscheiden. Ein solcher Unterschied ist jedoch auch dann zu erwarten, wenn die Entscheidung über die Bewegungsweite bei Bewegungsbeginn noch nicht vollständig beendet ist; er dürfte nur dann nicht auftreten, wenn die Bewegungen bei Beginn stets auf dieselbe Weite hinzielen würden, die unterschiedlichen geforderten Weiten also noch überhaupt nicht berücksichtigt wären. Trotz des Einwandes von M e g a w scheint mir daher die alternative Interpretation zuzutreffen.

Die Einwände gegen die Interpretation seiner Ergebnisse betreffen nicht die grundsätzliche Überlegung von M e g a w (1972a), sondern nur deren Anwendung auf die spezielle experimentelle Situation. Sie machen aber gleichzeitig deutlich, daß die Reaktionszeit ein nicht sehr geeignetes Kriterium zur Unterscheidung äquivalenter und nicht äquivalenter Bewegungen ist, denn sie hängt von sehr vielen anderen Faktoren ab, und es dürfte schwierig sein, alternative Interpretationen auszuschließen. In vielen Fällen dürfte beispielsweise die bei der Besprechung des Zusammenhanges von Reaktionszeit und Bewegungskomplexität erwähnte Interpretation möglich sein, daß gefundene Reaktionszeitunterschiede darauf zurückgehen, daß die Bereitstellung einer inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls bei verschiedenen Bewegungen unterschiedlich lange Zeit erfordert.

Selektive Ermüdung als Äquivalenzkriterium: Ein zweiter Ansatz zur Feststellung von Bewegungs-Äquivalenzen wurde von R o s e n b a u m (1977) verwendet, der seine Versuche mit Hilfe physiologischer Überlegungen begründet. Er spricht von "command neurons", die Bewegungen eines bestimmten Typs in verschiedenen Gliedmaßen kontrollieren sollen. Die Funktion dieser nervösen Strukturen entspricht der von Bewegungsprogrammen (vgl. K e e l e, 1976).

Der Nachweis solcher komplexen motorischen Neurone soll mit Hilfe des Verfahrens der selektiven Ermüdung möglich sein. (R o s e n b a u m spricht statt von Ermüdung von Adaptation; der Begriff der Ermüdung scheint mir in diesem Zusammenhang jedoch zutreffender.) Bei diesem Verfahren werden zwei einfache Bewegungen über einige Zeit möglichst oft ausgeführt, und anschließend wird getestet, wie häufig die Bewegungen während eines zweiten vorgegebenen Zeitintervalls ausgeführt werden können. Wenn die beiden Bewegungen mit A und B bezeichnet werden, hat die Vp in jeweils zwei Tätigkeitsperioden die Kombinationen A-A, B-A, B-B und A-B auszuführen. Sofern die Häufigkeit der Bewegungen in der Testperiode geringer ist, wenn in der ersten Tätigkeitsperiode dieselben Bewegungen ausgeführt wurden und nicht die anderen, kann man auf die Existenz von nervösen Strukturen schließen, die nur bei der einen Bewegung aktiv sind und nicht bei der anderen. Diese nervösen Strukturen stellen die Grundlage für die gefundene selektive Ermüdung dar.

Sofern es äquivalente Bewegungen gibt, ist bei diesem Verfahren zu erwarten, daß bei bestimmten Bewegungen in der ersten Tätigkeitsperiode die Häufigkeit der Bewegungen in der Testperiode genauso klein ist wie in dem Fall, in dem die Bewegungen in beiden Tätigkeitsperioden gleich sind. Dann wären die verschiedenen Bewegungen äquivalent. Bei einem Paar nicht äquivalenter Bewegungen dagegen sollte die Leistung in der Testperiode besser sein.

In den vier von R o s e n b a u m (1977) berichteten Versuchen hatten die Tätigkeitsperioden stets eine Dauer von 30 Sekunden, und die Pause zwischen ihnen war kürzer als 10 Sekunden. Die Bewegungen wurden in beiden Tätigkeitsperioden mit verschiedenen Armen ausgeführt, um die Wirkung von Muskelermüdung auszuschließen. Jede der vier Kombinationen A-A, B-A, B-B und A-B kam daher zweimal vor, einmal in der Reihenfolge linker Arm-rechter Arm und einmal mit der umgekehrten Reihenfolge beider Arme. Eine

Ausnahme ist der vierte Versuch, in dem in beiden Tätigkeitsperioden derselbe Arm verwendet wurde.

Die Bewegung A war in allen vier Versuchen kreisförmig: es war eine Kurbel zu drehen. Die Bewegung B war im dritten und vierten Versuch ebenfalls das Drehen einer Kurbel, nur in entgegengesetzte Richtung; im ersten Versuch war die Bewegung B das Hin- und Herbewegen eines Hebels, im zweiten Versuch das Hin- und Herdrehen eines Griffes durch Pronation und Supination (Drehung der beiden Unterarmknochen umeinander). Die abhängige Variable war stets die Häufigkeit, mit der die Bewegungen in der Testperiode von 30 Sekunden ausgeführt wurden.

Diese Häufigkeit war in allen vier Versuchen dann kleiner, wenn in der ersten Tätigkeitsperiode dieselbe Bewegung auszuführen war, als dann, wenn die Bewegungen in den beiden Tätigkeitsperioden verschieden waren. Dieses Ergebnis weist nach R o s e n b a u m auf die Existenz komplexer motorischer Neurone hin.

Zwei mögliche alternative Interpretationen werden von R o s e n b a u m zurückgewiesen: Zum einen könnten die Ergebnisse auf motivationale Einflüsse zurückgeführt werden, und zwar darauf, daß die Vpn bei geänderten Bewegungen sich stärker anstrengen als bei gleichbleibenden. Zum anderen könnten die Ergebnisse auf Muskelermüdung zurückgehen, vor allem im vierten Versuch. Dessen Interpretation beruht nämlich auf der Annahme, daß dieselben Muskeln durch Kurbeln in entgegengesetzte Richtungen in gleichem Maße ermüdet werden.

Die Ergebnisse von R o s e n b a u m (1977) weisen zwar auf komplexe Neurone hin, die gleiche Bewegungen mit verschiedenen Gliedmaßen steuern, aber nicht auf solche komplexen Neurone, die auch unterschiedliche Bewegungen steuern. In keinem der vier Versuche findet sich nämlich ein Paar verschiedener Bewegungen, bei dem die Leistung in der Testperiode genauso gering ist wie in der Bedingung, in der die Bewegungen in beiden Tätigkeitsperioden gleich sind, obwohl ein solches Ergebnis recht naheliegend erscheint. Im letzten Abschnitt wurde gesagt, daß die An-

nahme unplausibel ist, daß Zielbewegungen in entgegengesetzte Richtungen durch verschiedene Bewegungsprogramme gesteuert werden. Ist es nicht ebenso unplausibel, daß kreisförmige Bewegungen in entgegengesetzte Richtungen durch verschiedene Bewegungsprogramme, im Sinne von R o s e n b a u m also durch verschiedene komplexe motorische Neurone, gesteuert werden sollen? Wenn sie jedoch durch gleiche Bewegungsprogramme gesteuert werden, hätte im dritten und vierten Versuch keine selektive Ermüdung auftreten dürfen.

Da folglich die Ergebnisse der Versuche von R o s e n b a u m die Äquivalenz von Bewegungen in solchen Fällen nicht zeigen, in denen sie recht plausibel erscheint, liegt der Gedanke nahe, daß die gefundene selektive Ermüdung andere Ursachen hat als die Ermüdung komplexer Neurone, die Bewegungen eines bestimmten Typs in verschiedenen Gliedmaßen steuern. Eine solche alternative Interpretation wird von R o s e n b a u m in einem etwas anderen Zusammenhang angedeutet: Man kann nervöse Strukturen annehmen, die immer dann aktiv sind, wenn homologe Muskeln in beiden Armen kontrahiert werden. Solche nervösen Strukturen wären demnach für bestimmte Muskeln spezifisch, nicht aber für bestimmte zeitliche und räumliche Muster der Muskelaktivität. Nach dieser Überlegung kann die von R o s e n b a u m gefundene selektive Ermüdung also auch auf die Ermüdung muskelspezifischer nervöser Strukturen zurückgehen und braucht nicht auf die Ermüdung für bestimmte Bewegungsformen spezifischer Strukturen zurückgeführt zu werden.

Gegen eine solche alternative Interpretation der Ergebnisse von R o s e n b a u m kann man einwenden, daß bei den im dritten und vierten Versuch verwendeten kreisförmigen Bewegungen in entgegengesetzte Richtungen die Muskeln in jeweils gleicher Weise aktiv sein sollten und folglich auch muskelspezifische Strukturen in gleichem Maße ermüdet. Nach einer näheren Betrachtung des Kraftverlaufs beim Drehen einer Kurbel (siehe G l e n c r o s s, 1970, 1972b) dürfte das jedoch kaum zutreffen.

Hinzukommt, daß R o s e n b a u m geführte Bewegungen (siehe M e r z u.a., 1971) verwendete: Aufgrund der Mecha-

nik der Kurbel resultiert aus unterschiedlichen Muskelaktivitäten stets die gleiche Bewegung; wenn eine Kurbel über längere Zeit möglichst schnell gedreht werden muß, dürfte die Form der Muskelaktivität dabei mehrfach geändert werden. Diese Änderungen dürften beim Kurbeln in entgegengesetzte Richtungen kaum in gleicher Weise erfolgen, so daß schon dadurch muskelspezifische nervöse Strukturen in unterschiedlichem Ausmaß ermüdet werden sollten.

Auch dieser zweite Ansatz zum Nachweis von Klassen äquivalenter Bewegungen liefert also keine eindeutigen Ergebnisse. Die Kritik betrifft ebenso wie beim ersten Ansatz von M e g a w (1972a) nicht den grundsätzlichen Gedanken, äquivalente Bewegungen durch selektive Ermüdung nachzuweisen, sondern bezieht sich auf die spezielle experimentelle Situation, die alternative Interpretationen zuläßt.

A l l g e m e i n e F r a g e s t e l l u n g

Die beiden im letzten Kapitel beschriebenen Ansätze zum Nachweis äquivalenter Bewegungen haben bisher nicht zu schlüssigen Ergebnissen geführt. Daher soll hier ein anderer Ansatz verwendet werden, der dem von R o s e n b a u m (1977) recht ähnlich ist.

Eine Hypothese über selektive Einflüsse willkürlicher Bewegungen aufeinander

Als Kriterium für die Äquivalenz von Bewegungen sollen die Einflüsse unterschiedlicher Bewegungen aufeinander dienen: Eine Bewegung sollte den Verlauf einer anderen Bewegung dann beeinflussen, wenn beide Bewegungen durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert werden, nicht aber dann, wenn den beiden Bewegungen verschiedene Programme zugrundeliegen.

Die Begründung dieser "Hypothese selektiver Einflüsse willkürlicher Bewegungen aufeinander" entspricht der Hypothese selektiver Ermüdung. Zunächst wird auch hier vor-

ausgesetzt, daß verschiedenen Bewegungsprogrammen verschiedene nervöse Strukturen entsprechen. Eine zweite Voraussetzung ist, daß diese nervösen Strukturen Einflüsse verschiedener Bewegungen aufeinander vermitteln. Da es sich bei Bewegungen, die sich nur in den Programm-Parametern unterscheiden, um dieselbe zugrundeliegende Struktur handelt, sollten solche Bewegungen einander beeinflussen. Bei Bewegungen, denen verschiedene Programme zugrundeliegen, fehlen dagegen diese strukturellen Voraussetzungen für eine Beeinflussung; bei ihnen sind die nervösen Strukturen, deren Funktion der von Bewegungsprogrammen entspricht, verschieden.

Eine selektive Beeinflussung ist auch nach der Analogie zum Computer-Programm zu erwarten, denn auch danach sind zum einen verschiedene zugrundeliegende Strukturen bei verschiedenen Bewegungen anzunehmen, zum anderen aber dieselben: verschiedene Programme eines Rechners sind nämlich in verschiedenen Bereichen des Kernspeichers abgelegt, während unterschiedliche Werte von Parametern eines Programms in identische Speicherelemente eingesetzt werden.

Auf den ersten Blick erscheint diese Hypothese selektiver Beeinflussung als eine Verallgemeinerung von R o s e n b a u m s (1977) Hypothese selektiver Ermüdung; schließlich untersucht ja auch R o s e n b a u m den Einfluß einer vorhergehenden auf eine nachfolgende Bewegung. Diese Auffassung, daß es sich bei den beiden Hypothesen um einen spezielleren Fall und einen allgemeineren Fall handelt, trifft jedoch nur dann zu, wenn man sich entweder einfach am Begriff "Beeinflussung" orientiert oder aber an der Begründung beider Hypothesen, daß nämlich bestimmten Bewegungen gleiche, anderen aber verschiedene nervöse Strukturen, die die Bewegungsform festlegen, zugrundeliegen.

Die beiden Hypothesen erscheinen jedoch nicht als spezieller und allgemeiner Fall, wenn man sich die Prozesse, durch die einerseits Ermüdung und andererseits Beeinflussung des Verlaufs einer anderen Bewegung zustandekommen, vor Augen führt. Ermüdbarkeit ist zum Beispiel eine Eigenschaft aller Nervenzellen, und Ermüdung einer bestimmten nervösen Struktur sollte sich stets in gleicher Weise auf die durch diese Struktur kontrollierte Bewegung auswirken, unabhängig davon, wie diese Ermüdung zustande

gekommen ist. Die nach der Hypothese selektiver Beeinflussung zu erwartenden Einflüsse einer Bewegung auf den Verlauf einer anderen Bewegung, die durch dasselbe Programm gesteuert wird, sollten dagegen spezifisch sein; der Verlauf einer bestimmten Bewegung sollte also durch verschiedene andere Bewegungen in unterschiedlicher Weise modifiziert werden. Außerdem sollten solche Einflüsse nicht durch alle möglichen nervösen Strukturen vermittelt werden können, was im folgenden noch ausführlicher zu behandeln ist.

Zur Auffindbarkeit selektiver Einflüsse

Auswahl der Bewegungen: Zur Prüfung der Hypothese selektiver Einflüsse sind mindestens drei Bewegungen erforderlich: eine Bewegung, deren Beeinflussung untersucht wird, und zwei Bewegungen, die diese Beeinflussung bewirken (bzw. nicht bewirken) sollen. Von diesen beiden Bewegungen sollte die eine durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert werden wie die erste Bewegung, die andere aber durch ein anderes.

Die Auswahl von zwei Bewegungen, die durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert werden, und einer dritten, der ein anderes Programm zugrundeliegt, kann nur nach Plausibilitätserwägungen erfolgen. Danach sollten Zielbewegungen mit unterschiedlichen Verläufen sich nur in den Programm-Parametern unterscheiden (siehe S c h m i d t, 1975). Als Bewegung, die durch ein anderes Programm gesteuert wird, kommt eine mit einem "sinusförmigen" Zeitverlauf in Frage: bei einer solchen "Sinusbewegung" ist die Weg-Zeit-Kurve eine harmonische Funktion.

Die Auswahl von Bewegungen, die durch dasselbe Bewegungsprogramm oder durch verschiedene Programme gesteuert werden sollen, kann zwangsläufig nicht mit größerer Sicherheit getroffen werden. Eine solche Auswahl setzt ja voraus, daß Bewegungsprogramme überhaupt existieren; die Frage nach gleichen oder verschiedenen Programmen bei verschiedenen Bewegungen ist also der nach der Existenz von Bewegungsprogrammen nachgeordnet. Indem die Auffindbarkeit äquivalenter Bewegungen zum Kriterium für das Vorhandensein von Bewegungsprogrammen gemacht wird, werden beide Fragen gleichzeitig behandelt; es ist jedoch nicht möglich, beide Fragen in umgekehrter Reihenfolge zu prüfen.

Da beide Fragen mit Hilfe der Hypothese selektiver Beeinflussung gleichzeitig geprüft werden, ist in dem Fall, in dem keine selektive Beeinflussung gefunden wird, kein eindeutiger Schluß möglich: entweder ist dann das Bewegungsprogramm-Konzept inadäquat, oder die A priori-Klassifikation der untersuchten Bewegungen war unzutreffend. Im Fall einer Bestätigung der Hypothese wird entsprechend sowohl die Annahme von Bewegungsprogrammen wie auch die Klassifikation der Bewegungen unterstützt.

Auswahl des Übungsstadiums: Zielbewegungen sind im Alltag recht häufig und dürften bereits zu Beginn eines Experimentes hoch überlernt sein. (Ein im Experiment zu beobachtender Übungsfortschritt dürfte nur auf eine Verbesserung der Anpassung an die speziellen Bedingungen zurückgehen, unter denen die Zielbewegungen im Versuch auszuführen sind.) Sofern überhaupt Bewegungsprogramme existieren, sollten sie daher für Zielbewegungen bereits bei Beginn des Experiments vorhanden sein. Anders ist es möglicherweise bei Sinusbewegungen, die im Alltag kaum oder gar nicht vorkommen. Daher scheint es günstiger, die Hypothese selektiver Beeinflussung erst in einem fortgeschrittenen Übungsstadium zu prüfen, denn Bewegungsprogramme sollten sich im Übungsverlauf entwickeln.

Noch eine zweite Überlegung spricht dafür, die Hypothese erst dann zu prüfen, wenn der Übungsfortschritt im wesentlichen beendet ist. Während des Lernens dürften etwaige selektive Einflüsse nämlich nur schwer feststellbar sein, weil sie von den Wirkungen einer Reihe anderer Faktoren überlagert sein sollten; insbesondere ist hier an eine Mitübung der jeweils anderen Bewegung zu denken und an Unterschiede im Ausmaß dieser Mitübung.

Eine Variante der Hypothese selektiver Beeinflussung könnte in einer Hypothese selektiver Mitübung gesehen werden: Übungstransfer sollte nur zwischen Bewegungen auftreten, die durch dasselbe Programm gesteuert werden. Aus zwei Gründen scheint die Prüfung einer solchen Hypothese aber kaum erfolgreich sein zu können. Zum einen sollte der Übungs-Transfer zwischen Bewegungen, denen dasselbe Bewegungsprogramm zugrundeliegt, überlagert sein von spezi-

ellen Einflüssen der Bewegungsverläufe aufeinander und etwaigen Änderungen der Stärke solcher Einflüsse im Übungsverlauf. Zum zweiten sollte ein Transfer auch zwischen Bewegungen auftreten, die durch verschiedene Programme gesteuert werden, denn im Übungsverlauf dürfte sich auch die Funktion anderer für die Bewegungsausführung maßgeblicher Strukturen ändern, die allen Bewegungen gemeinsam sind.

Auswahl der abhängigen Variablen: Da bei Zielbewegungen die Vorlage nur die Start- und Zielposition festlegt und die Bewegungen folglich recht variabel verlaufen, worauf H a c k e r (1967) hinweist, sollten sich Einflüsse anderer Bewegungen besonders leicht auswirken können. Damit diese Einflüsse aber auch aufzufinden sind, ist es notwendig, den Verlauf der Zielbewegungen genauer zu erfassen als nur durch die Zielgenauigkeit und die Bewegungszeit, die die gebräuchlichsten abhängigen Variablen bei der Untersuchung solcher Bewegungen darstellen.

Für die genauere Erfassung des Bewegungsverlaufs gibt es in erster Linie zwei Gründe. Zum einen sollten sich Einflüsse anderer Bewegungen in den Aspekten des Verlaufs von Zielbewegungen zeigen, in denen tatsächlich Unterschiede zwischen den Bewegungen vorliegen. Eine Beeinflussung der Zielgenauigkeit wäre beispielsweise zu erwarten, wenn Zielbewegungen unterschiedlicher Weite untersucht werden. Eine Sinusbewegung hat jedoch in diesem Sinne gar kein Ziel, sondern nur einen in charakteristischer Weise anderen Verlauf als eine Zielbewegung. Wenn nur die Zielgenauigkeit erfaßt würde, sollte die Sinusbewegung folglich allein aufgrund der verwendeten abhängigen Variablen keinen Einfluß auf den Verlauf der Zielbewegung zeigen. Das Ergebnis wäre somit ein Artefakt.

Der zweite Grund für die genauere Erfassung des Bewegungsverlaufs ist darin zu sehen, daß sicherlich nicht die ganze Zielbewegung durch ein Programm gesteuert wird. Allgemein werden bei der Zielbewegung zwei Phasen unterschieden (z.B. K ü p f m ü l l e r & P o k l e k o w-

s k i, 1956; S c h m i d t k e, 1960; H a c k e r, 1967; W a s s m u n d, 1968). In der zweiten Phase wird das Ziel genau erreicht; das soll vor allem durch visuelle Regelung geschehen. Eine Programm-Steuerung ist daher im wesentlichen in der ersten Phase der Bewegung zu erwarten, in der der Hauptteil der Distanz zum Ziel zurückgelegt wird. Vor allem in dieser ersten Bewegungsphase sollte sich folglich auch eine Beeinflussung zeigen. Bei einer Variablen wie der Bewegungszeit beispielsweise tritt eine solche Beeinflussung aber nicht notwendigerweise in Erscheinung: Die Dauern der beiden Phasen können einander nämlich kompensieren, d.h., je kürzer die erste Phase ist, desto länger dauert die zweite. Entsprechende negative Korrelationen berichten B r o w n & S l a t e r - H a m m e l (1949).

Andere Grundlagen einer Beeinflussung

Bei der Begründung der Hypothese selektiver Einflüsse willkürlicher Bewegungen aufeinander und auch bei der bisherigen Diskussion der Bedingungen, unter denen diese Hypothese sinnvoll geprüft werden kann, blieb unberücksichtigt, daß Einflüsse zwischen verschiedenen Bewegungen nicht nur durch gemeinsame Bewegungsprogramme vermittelt werden können. Andere Faktoren können ebenfalls Grundlage solcher Beeinflussung sein. Diese Faktoren sind aus zwei Gründen von Bedeutung. Zum einen können sie eine selektive Beeinflussung, die aufgrund gleicher bzw. verschiedener Bewegungsprogramme auftreten würde, überlagern. Die Ausschaltung der Wirkungen solcher anderer Faktoren ist insofern eine Bedingung dafür, daß selektive Beeinflussung überhaupt gezeigt werden kann. Außerdem könnte es aber auch möglich sein, eine gefundene selektive Beeinflussung auf solche anderen Faktoren zurückzuführen; die Wirkung dieser Faktoren muß also auch ausgeschaltet werden, damit alternative Interpretationen einer aufgefundenen selektiven Beeinflussung ausgeschlossen werden können. Im folgenden soll be-

sprochen werden, welche anderen Faktoren als Grundlage einer Beeinflussung in Frage kommen.

Struktur versus Kapazität: K a h n e m a n (1973, Kap. 10) unterscheidet zwei Ursachen für die Interferenzen bei Doppeltätigkeit. "Strukturelle Interferenz" ist darauf zurückzuführen, daß bestimmte Strukturen von beiden Tätigkeiten beansprucht werden, z.B. dann, wenn beide Aufgaben visuelle Wahrnehmung erfordern oder in beiden Fällen verbales Material verwendet wird. "Kapazitäts-Interferenz" ist dagegen unabhängig von der speziellen Form beider Aufgaben; sie hängt vielmehr vom Ausmaß der Beanspruchung durch die Tätigkeiten ab. Die Idee dabei ist, daß ein begrenztes Maß an Informationsverarbeitungs-Kapazität, Aufmerksamkeit oder Anstrengung auf beide Tätigkeiten verteilt werden muß und dadurch die Leistung bei zumindest einer der Aufgaben beeinträchtigt wird.

Die Hypothese selektiver Beeinflussung willkürlicher Bewegungen geht nun davon aus, daß das Vorhandensein oder Fehlen einer gemeinsamen Struktur für die Beeinflussung maßgeblich ist. Eine Beeinflussung als Folge begrenzter Kapazität muß daher ausgeschlossen werden. Dazu ist es notwendig, die Einflüsse zwischen nacheinander ausgeführten Bewegungen zu untersuchen, nicht aber die zwischen gleichzeitig ausgeführten.

Innere Repräsentation des Bewegungs-Solls: Bevor die motorischen Kommandos für die auszuführende Bewegung bereitgestellt werden können, muß die in der Umwelt vorgegebene Vorlage wahrgenommen (oder erinnert) werden. Dabei können systematische Fehler auftreten in Abhängigkeit von der Vorlage für die vorhergehende Bewegung oder in Abhängigkeit von Erwartungen, die auf der Grundlage früherer Bewegungen entwickelt werden. Die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls kann also verfälscht sein und somit die Beeinflussung des Verlaufs einer Bewegung durch eine vorhergehende Bewegung vermitteln.

Diese Grundlage für Einflüsse zwischen verschiedenen Bewegungen ist vor allem deshalb von Bedeutung, weil sie zu einer selektiven Beeinflussung führen kann. Bei Zielbewegungen unterschiedlicher Weite zum Beispiel dürfte eine zunächst falsche Lokalisation des Zielpunktes leicht dadurch zustandekommen, daß er - wegen vorhergehender Zielbewegungen mit anderen Zielen - an einer anderen Stelle erwartet wurde als der, an der er tatsächlich liegt. Durch vorhergehende Vorlagen für Sinusbewegungen dagegen dürfte die Lokalisation des Ziels für eine Zielbewegung kaum beeinflußt werden, denn die Vorlagen für beide Bewegungen sind völlig verschieden.

Durch systematische Fehler in den inneren Repräsentationen des Bewegungs-Solls lassen sich die Ergebnisse interpretieren, die bisher zur Beeinflussung des Verlaufs von Bewegungen durch vorhergehende andere Bewegungen vorliegen. In allen Experimenten wurden Zielbewegungen unterschiedlicher Weite verwendet, und das Ergebnis war stets ein "range"-Effekt: Bei den Bewegungen kleinerer Weite ist die Bewegung zu weit, bei den Bewegungen größerer Weite aber zu kurz.

Dieses Ergebnis fand sich bei zwei grundsätzlich verschiedenen Versuchsanordnungen. Die erste Gruppe von Experimenten betrifft das motorische Kurzzeitgedächtnis. In diesen Experimenten haben die Vpn in aller Regel die Augen verbunden. Sie führen eine Zielbewegung A mit bestimmter Weite aus, die zumeist durch einen mechanischen Anschlag festgelegt ist. Vor oder nach dieser Bewegung wird eine Bewegung B mit größerer oder kleinerer Weite auf dieselbe Art ausgeführt. Schließlich muß die Bewegung A, nachdem der Anschlag entfernt ist, reproduziert werden (A s c o l i & S c h m i d t, 1969; S t e l m a c h , 1969a, b; F a u s t - A d a m s, 1972; S t e l m a c h & B a r b e r, 1970; C r a f t & H i n r i c h s, 1971; P a t r i c k, 1971; R o y & D a v e n p o r t, 1972; S t e l m a c h & W a l s h, 1973; L a a b s, 1974). Diese Versuche legen in besonderem Maße die Interpretation nahe, daß die gespeicherte Zielposition der Bewegung A durch die für die Bewegung B gewissermaßen etwas verschoben wird.

Die zweite Gruppe sind Tracking-Experimente, in denen die Vorlage aus einer Folge von Stufen unterschiedlicher Weite besteht, deren Reihenfolge zufällig ist (T a y l o r & B i r m i n g h a m, 1948; S l a c k, 1953; P o u l t o n, 1973a, S. 81-83, P o u l t o n, 1973b). In diesen Versuchen ist die Vorlage stets sicht-

bar, so daß alle Zielbewegungen letzten Endes genau die geforderte Weite haben. Bevor sie das Ziel erreichen, treten jedoch häufig deutlich erkennbare Korrekturbewegungen auf. Der range-Effekt zeigt sich, wenn die Bewegungsweite vor Beginn der Korrekturbewegungen erfaßt wird.

Da die Vorlage in diesen Versuchen sichtbar ist, scheint es weniger plausibel als bei den Versuchen der ersten Gruppe, daß die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls verfälscht sein soll und nicht genau der sichtbaren Vorlage entspricht. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß das Ziel der nächsten Zielbewegung nicht genau antizipiert werden kann und zudem die Bewegungen möglichst schnell nach dem Sprung des Ziels auf die neue Zielposition begonnen werden müssen. Im Augenblick des Bewegungsbeginns kann unter diesen Bedingungen die visuelle Lokalisation des Zielpunktes durchaus noch ungenau und durch die Erwartungen über das nächste Ziel beeinflußt sein.

Damit systematische Fehler in den inneren Repräsentationen des Bewegungs-Solls verhindert werden, muß die Vorlage für die Bewegungen gesehen werden können, und die Erwartungen hinsichtlich der Vorlage für die nächste Bewegung müssen richtig sein, was zum Beispiel bei leicht lernbaren Folgen von Bewegungen der Fall sein sollte. Andere spezielle Aspekte der Versuchsanordnung, die auf die Verhinderung systematischer Fehler bei der Lokalisation der Bewegungsziele im Augenblick des Bewegungsbeginns abzielen, werden im Zusammenhang der einzelnen Versuche beschrieben werden.

Motorische Endstrecke: Die motorischen Kommandos, die durch ein Bewegungsprogramm oder auf andere Art (z.B. zentrale Regelung, direkte Steuerung) entsprechend der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls bereitgestellt werden, werden in der "motorischen Endstrecke" weiter verarbeitet. Mit diesem Begriff sollen die Strukturen bezeichnet werden, die an der Umsetzung der motorischen Kommandos in eine Bewegung beteiligt sind. Im wesentlichen handelt es sich dabei um den Muskel, die segmentalen Strukturen des Rückenmarks, die Ursprungsneurone der efferenten Bahnen und möglicherweise weitere nervöse Strukturen, die an

der Kontraktion einzelner Muskeln mitwirken.

Anatomisch ist die motorische Endstrecke kaum oder gar nicht von den nervösen Strukturen abzugrenzen, deren Funktion der von Bewegungsprogrammen entspricht, aber funktionell. Die einem Bewegungsprogramm entsprechende Struktur sollte nämlich immer dann Aktivität zeigen, wenn Bewegungen eines bestimmten Typs ausgeführt werden; sie ist spezifisch für eine bestimmte Bewegungsform. (Dieses Postulat liegt ja der hier zu untersuchenden Hypothese zugrunde.) Eine motorische Endstrecke dagegen ist spezifisch für bestimmte Muskeln; sie ist immer dann aktiv, wenn diese Muskeln kontrahiert werden, und zwar unabhängig von der Form der Kontraktion.

Es ist sehr unwahrscheinlich, daß die motorische Endstrecke den Einfluß einer Bewegung auf den Verlauf einer nachfolgenden anderen Bewegung vermitteln kann. Dann müßte sie nämlich entweder in der Lage sein, die speziellen efferenten Kommandos einer Bewegung zu speichern, oder aber sie müßte ihre Eigenschaften bei Ausführung einer Bewegung verändern. Im letzteren Fall würden diese Eigenschaften etwa an eine spezielle Bewegung angepaßt werden, und als Ergebnis dieser Anpassung würde eine nachfolgende Bewegung einen modifizierten Verlauf zeigen (vorausgesetzt, daß die Anpassung während oder nach Ausführung einer Bewegung erfolgt, nicht aber vorher).

Zumindest die peripheren und segmentalen Strukturen der motorischen Endstrecke sind jedoch offenbar nicht in der Lage, spezielle efferente Kommandos zu speichern, noch ändert sich die Art und Weise, in der sie die Information höherer Zentren verarbeiten, in Abhängigkeit von vorhergehender Aktivität. Eine Ausnahme stellen lediglich Ermüdungserscheinungen dar, die jedoch bei hinreichenden Pausen zwischen den auszuführenden Bewegungen keine Rolle spielen sollten. Einflüsse auf der Grundlage der motorischen Endstrecke dürften folglich kaum die erwarteten selektiven Einflüsse überlagern.

Praktisch unmöglich dürfte es sein, daß die motorische Endstrecke die Grundlage für eine selektive Beeinflussung abgibt (mit Ausnahme des Falls, in dem das Ausmaß der Ermüdung durch die verschiedenen Bewegungen verschiedenen ist). Nach ihrer Definition nämlich ist die motorische Endstrecke für alle unterschiedlichen Bewegungen, an denen dieselben Muskeln beteiligt sind, gleich. Selektive Beeinflussung kann durch die motorische Endstrecke folglich nicht auf die Art vermittelt werden, daß an bestimmten verschiedenen Bewegungen dieselben Strukturen beteiligt sind, an anderen aber unterschiedliche. Auch zeigen die Bewegungsverläufe für Zielbewegungen und Sinusbewegungen keinen qualitativen Unterschied wie etwa die Vorlagen (stetig versus unstetig), so daß auch dann, wenn die motorische Endstrecke efferente Kommandos speichern könnte oder ihre Eigenschaften an spezielle Bewegungen anpassen würde, keine selektive Beeinflussung zu erwarten wäre, wie sie etwa durch die inneren Repräsentationen des Bewegungs-Solls vermittelt werden könnte.

Diese Überlegungen über die Möglichkeiten einer Beeinflussung des Verlaufs einer Bewegung durch eine vorhergehende andere Bewegung, die durch die motorische Endstrecke vermittelt wird, mögen überflüssig erscheinen. Es scheint nämlich auf den ersten Blick eine einfache Methode zu geben, diese Möglichkeit experimentell auszuschalten, indem die verschiedenen Bewegungen mit verschiedenen Gliedmaßen ausgeführt werden.

Bei dieser Methode wird vorausgesetzt, daß die motorische Endstrecken beispielsweise der paarigen Armmuskeln vollständig lateralisiert sind und keinerlei Überlappung zeigen. Wie bereits bei der Diskussion der Ergebnisse von R o s e n b a u m (1977) erwähnt wurde, ist diese Voraussetzung jedoch möglicherweise unzutreffend. Es gibt unter Umständen nervöse Strukturen, die immer dann aktiv sind, wenn zumindest einer von zwei paarigen Muskeln kontrahiert wird. Für die Existenz solcher Strukturen spricht zum Beispiel die Schwierigkeit bei der gleichzeitigen Ausführung auch recht verschiedener Bewegungen mit beiden Armen. Wenn überhaupt die motorische Endstrecke Grundlage einer Beeinflussung sein kann, sollte sie auf solche relativ hoch gelegenen

Strukturen zurückgehen. Daher hat die Verwendung verschiedener Gliedmaßen kaum Vorteile.

Als zweites wird bei der Verwendung verschiedener Gliedmaßen in diesem Zusammenhang vorausgesetzt, daß gleiche Bewegungen mit ihnen auch durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert werden. Das scheint zwar plausibel, trifft aber nicht notwendig zu. Da zudem der apparative Aufwand größer wird, wenn etwa Bewegungen mit beiden Armen untersucht werden, ist es sinnvoll, die Hypothese selektiver Beeinflussung zunächst mit Bewegungen zu prüfen, die stets mit demselben Körperglied ausgeführt werden.

Speziellere Formulierung der Hypothese

Nach den Überlegungen des letzten Abschnitts kann die Hypothese der selektiven Beeinflussung willkürlicher Bewegungen für die im folgenden darzustellenden Versuche spezieller formuliert werden. Sie umfaßt zwei Teile:

1. Der Verlauf einer Zielbewegung wird durch eine vorhergehende andere Zielbewegung beeinflußt.
2. Der Verlauf einer Zielbewegung wird durch eine vorhergehende Sinusbewegung nicht beeinflußt.

Die spezielle Form der Beeinflussung, die zu erwarten ist, ergibt sich aus der Art, auf die sich die Verläufe der verschiedenen Bewegungen voneinander unterscheiden; sie wird bei der Darstellung der Versuche näher beschrieben werden.

V e r s u c h 1

Fragestellung

Im ersten Versuch soll der erste Teil der Hypothese selektiver Beeinflussung geprüft werden. Danach soll eine Zielbewegung den Verlauf einer nachfolgenden anderen Zielbewegung beeinflussen.

Eine einfache Methode, Einflüsse, die auf systematische Fehler in der Lokalisation des Bewegungsziels zu Beginn der Bewegung zurückgehen, auszuschließen, besteht darin, für alle Bewegungen Start- und Zielposition konstant zu halten. Die Bewegungen müssen sich dann in anderer Hinsicht

unterscheiden; hier soll ihre mittlere Geschwindigkeit variiert werden. Zu erwarten ist, daß eine Bewegung, sofern ihr eine langsamere Bewegung vorausgeht, ebenfalls langsamer ausgeführt wird als in dem Fall, in dem ihr eine schnelle Bewegung vorausgeht. ("Langsamer" heißt hier in erster Linie: mit geringerem Kraftaufwand. Wie bereits beschrieben wurde, muß sich ein Einfluß nicht notwendig auch in der mittleren Bewegungsgeschwindigkeit bzw. der Bewegungszeit zeigen, da ein langsamerer erster Teil der Bewegung durch einen schnelleren zweiten hinsichtlich der Gesamtdauer ausgeglichen werden kann.)

Eine weitere Erwartung betrifft die Variabilität der Bewegungsverläufe: Die Verläufe schneller Zielbewegungen sollten sich stärker voneinander unterscheiden, wenn sie mit langsamen Bewegungen alternieren, als dann, wenn nur schnelle Bewegungen auszuführen sind. Im ersten Fall sollte nämlich zur spontanen Variabilität noch eine zusätzliche Komponente hinzukommen, die darauf zurückgeht, daß das Ausmaß der Beeinflussung durch die vorhergehende Bewegung variiert.

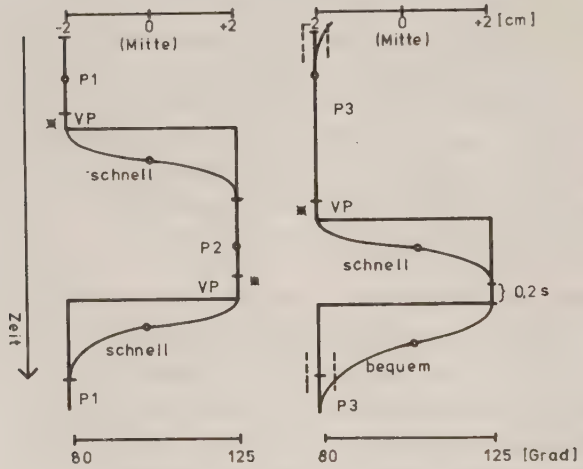
Methode

Der Versuch wurde mit einer Folgetracking-Anordnung durchgeführt. Die Bewegungsziele wurden durch die Positionen einer senkrechten Linie auf dem Bildschirm eines Oszilloskops vorgegeben. Die Vp mußte einen Kreis mit der senkrechten Linie in Deckung bringen bzw. halten. Die Position des Kreises auf dem Bildschirm war der Position des Unterarms der Vp proportional, den sie in einer horizontalen Ebene bewegen konnte.

Versuchsbedingungen: In zwei Versuchsgruppen waren alternierend Zielbewegungen nach rechts und links auszuführen, die gleiche Weiten hatten. Die Bewegungen nach rechts sollten stets "möglichst schnell und genau" sein. Die Bewegungen nach links waren in der Kontrollgruppe

ebenfalls "möglichst schnell und genau" auszuführen, in der Experimentalgruppe jedoch in "bequemen Tempo".

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Versuchsdurchgangs in beiden Gruppen; die Weiten der Bewegungen sind dieser Abbildung zu entnehmen. Die Bewegungen nach rechts, für die in beiden Gruppen die Geschwindigkeits-Instruktion gleich war, werden im folgenden als "Standardbewegungen" bezeichnet.



Kontrollgruppe Experimentalgruppe

Abbildung 1: Ablauf eines Versuchsdurchgangs

dicke Linie: Positionen der Vorlage
dünne Linie mit Kreisen: Bewegung der Vp

obere Skala: Positionen auf der Anzeige
untere Skale: Armpositionen (Winkel zwischen Ober- und Unterarm)

Dauer der Pausen P1: 1.8 oder 2.2 s
P2: 1.8 oder 2.2 s
P3: 4.0 s
Dauer der Vorperiode VP: 0.2, 0.4 oder 0.6 s

In Abbildung 1 wird deutlich, daß die zu erwartenden Einflüsse zwischen den verschiedenen Bewegungen, die sich als Unterschiede zwischen beiden Versuchsgruppen im Verlauf der Standardbewegungen zeigen müßten, nicht auf Fehler bei der Lokalisation des Zielpunktes zurückgeführt werden können. Die beiden Gruppen unterscheiden sich nämlich nur in der Geschwindigkeits-Instruktion für die Bewegung von rechts nach links, während die Vorlage für beide Gruppen identisch ist.

Die beiden Versuchsgruppen bestanden aus jeweils 12 männlichen Vpn im Alter von 18 bis 31 Jahren (Median: 23 Jahre). Die Vpn waren Studenten verschiedener Studienfächer, die freiwillig und ohne Bezahlung am Versuch teilnahmen.

Versuchsablauf: Der ganze Versuch war in drei Versuchsblöcke unterteilt. In den ersten beiden Blöcken, die je 100 Versuchsdurchgänge umfaßten, wurden die Bewegungen geübt. Nach dieser Anzahl von Bewegungen ist der Übungsfortschritt nach Vorversuchen und nach Ergebnissen von K a l v e r a m u.a. (1973) mit nahezu denselben Bewegungen, wie sie hier untersucht wurden, praktisch beendet. Zwischen den beiden Blöcken, die jeweils 14 bis 15 Minuten dauerten, lag eine Pause von 10 Minuten.

Nach einer weiteren Pause von 10 Minuten - in den Pausen konnten sich die Vpn jeweils frei bewegen - folgte der Testblock, der aus 10 Übungsdurchgängen bestand und anschließend 100 Durchgängen, in denen die Standardbewegungen registriert wurden. Der ganze Versuch dauerte ca. 70 Minuten.

In der Kontrollgruppe bestand ein Versuchsdurchgang aus der Sequenz Pause, Vorperiode, Standardbewegung, Pause, Vorperiode, schnelle Bewegung nach links. In der Versuchsgruppe bestand der wiederholte Zyklus aus Pause, Vorperiode, Standardbewegung und bequemer Bewegung nach links. Die Dauer der einzelnen Abschnitte der Versuchsdurchgänge ist in Abbildung 1 angegeben. Die Versuchsdurchgänge folgten unmittelbar aufeinander.

Während der Pause mußte die Vp, wie in Abbildung 1 angedeutet, den Kreis auf der Linie halten. Während der

Vorperiode war der Kreis nicht sichtbar; er wurde erst in dem Augenblick wieder eingeblendet, in dem die Linie auf die neue Zielposition sprang.

Außer in der mittleren Geschwindigkeit der Bewegung nach links unterschieden sich die beiden Versuchsgruppen, wie Abbildung 1 zeigt, noch in anderer Hinsicht: In der Kontrollgruppe lag vor der Bewegung nach links eine Pause und eine erneute Vorperiode; in der Experimentalgruppe dagegen sprang die senkrechte Linie 0.2 Sekunden nach Ende der Standardbewegung auf die linke Zielposition, und die Vp konnte nach diesem Sprung zu einem frei wählbaren Zeitpunkt die bequeme Bewegung nach links ausführen. Zum Ausgleich des kürzeren Zeitintervalls zwischen der Standardbewegung nach rechts und der Rückbewegung nach links war die Pause vor der Standardbewegung verlängert; sie ist außerdem deshalb länger, weil, wie später noch erläutert wird, der Beginn dieser Pause in Bezug zur vorhergehenden Bewegung anders definiert war als bei den Pausen in der Kontrollgruppe.

Die unterschiedlichen Pausenlängen in beiden Gruppen mögen zunächst als Mangel der Versuchsanordnung erscheinen. Es ist jedoch unmöglich, wenn in zwei Gruppen Bewegungen mit unterschiedlichen Bewegungszeiten auszuführen sind, sowohl die Pausen zwischen den einzelnen Bewegungen wie auch die Dauer jedes einzelnen Versuchsdurchgangs und somit die Dauer des ganzen Versuchs in beiden Gruppen gleich zu halten. Von den beiden Möglichkeiten - entweder sind die Pausen in beiden Gruppen gleich lang und die Dauer der Versuchsdurchgänge ist unterschiedlich, oder die Dauer der Versuchsdurchgänge ist gleich und die Pausen dauern unterschiedlich lange - wurde hier die zweite gewählt. In einem Vorversuch wurde die Pausenzeiten so ausgewählt, daß die mittlere Dauer jedes Versuchsdurchgangs in beiden Gruppen etwa gleich war.

Bei diesem Verfahren kann die Dauer der Versuchsdurchgänge in jeder Gruppe nicht konstant gehalten werden. Der erste Grund dafür ist die Variabilität der Bewegungszeiten. In diesem Versuch kam noch die Variabilität der Vorperioden-Dauern hinzu und die in einigen Durchgängen um 0.4 Sekunden verlängerte Pause (der Grund dafür wird später erläutert werden). Außerdem wurde die Pause (um 0.8 bzw. 1.2 Sekunden verkürzt) wiederholt, wenn sich die Vp während dieser Zeit bewegte, so daß Kreis und Linie nicht mehr in Deckung waren. Auch die Vorperiode wurde wiederholt, wenn die Vp die Zielbewegung vorzeitig begann. Sie hörte dann einen Ton, und der Kreis wurde wieder sichtbar. Er wurde erneut unsichtbar, sobald die Vp wieder auf der Startposition war; im gleichen Augenblick hörte der Ton auf, und die Vorperiode

begann von vorn.

Zur Kontrolle, ob die mittlere Dauer der Versuchsdurchgänge tatsächlich in beiden Gruppen gleich war, wurde sie gemessen (ohne die Bewegungszeit für die Standardbewegungen). Der Mittelwert in der Kontrollgruppe betrug 6.4 Sekunden (Standardabweichung: 0.11 Sekunden) und in der Experimentalgruppe 6.2 Sekunden (0.31 Sekunden).

Versuchsapparatur: Der Versuch fand in einem bis auf eine schwache indirekte Beleuchtung abgedunkelten Raum statt. Die Geräte zur Versuchssteuerung und Datenregistrierung befanden sich im Nebenraum.

Abbildung 2 zeigt den Platz der Vp. Die Anzeige war eine 13x4 Zentimeter große Öffnung in einer Blende vor dem Bildschirm eines Oszilloskops. Die Bewegungsziele wurde durch die Positionen einer zwei Zentimeter langen senk-

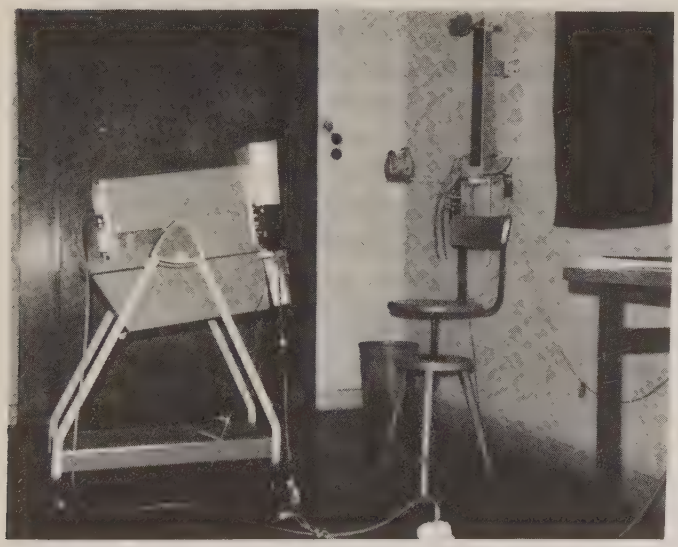


Abbildung 2: Platz der Versuchsperson
(Erläuterung im Text)

rechten Linie vorgegeben; der Kreis, der die Bewegung der Vp auf dem Bildschirm abbildete, hatte einen Durchmesser von ca. 0.25 Zentimeter.

Der Oberarm der Vp lag waagerecht auf einer gepolsterten Auflage und war dort mittels eine Manschette fixiert. Das Ellbogengelenk lag über dem Drehpunkt eines Hebelarms, der durch eine weitere Manschette an seinem vorderen Ende, die um das Handgelenk der Vp gelegt wurde, fest mit dem Unterarm verbunden war. Die Drehbewegungen des Hebelarms entsprachen so genau den Drehbewegungen des Unterarms. Vom vorderen Ende des Hebelarms führte eine Schnur zu einer Aufhängung, die sich ca. 65 Zentimeter oberhalb des Drehpunktes befand. Der Unterarm wurde dadurch passiv in der Horizontalen gehalten.

Die Registrierung der Bewegung erfolgte durch ein Potentiometer und eine Drehspule (Generator), auf die die Drehbewegung des Hebelarms übertragen wurde. Die Spannung am Potentiometer ist der Position des Unterarms proportional, die an der Drehspule seiner Geschwindigkeit. Durch Differenzieren der der Geschwindigkeit proportionalen Signalspannung wurde die Beschleunigung des Unterarms erfaßt. Alle Signalspannungen hatten definierte Beziehungen zum Drehwinkel des Unterarms und konnten so in Winkeleinheiten umgerechnet werden.

Die Position und die Beschleunigung des Unterarms sowie die Position der senkrechten Linie wurden digital auf einem Magnetband registriert. Die Analog-Digital-Wandlung erfolgte im 500 Hz - Takt mit 1/100 Volt als Einheit. (Alle Variablen in der Zeitdimension wurden also in der Einheit von zwei Millisekunden erfaßt; die Bestimmung der Position erfolgte in Einheiten von 0.1125 Grad und die der Drehbeschleunigung in Einheiten von 5.725 Grad pro Sekunde-Quadrat.)

Abbildung 3 zeigt ein Schema der Signalverarbeitung, dem die Einzelheiten zu entnehmen sind.

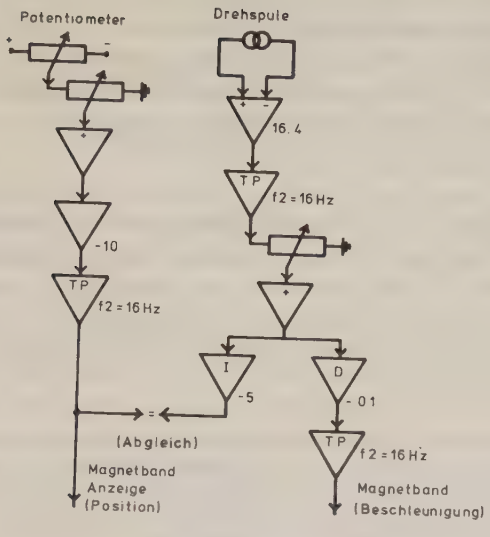


Abbildung 3: Verarbeitung der registrierten Signale (Symbole nach K a l v e r a m,1975)

Neben Registrierung und Darbietung der Position des Unterarms auf dem Bildschirm wurden sowohl das Positionssignal wie auch das Beschleunigungssignal noch für einen weiteren Zweck verwendet. Das Positionssignal diente der Prüfung, ob der Kreis in den Pausen zwischen den einzelnen Bewegungen und während der Vorperioden auf der Startposition für die nächste Bewegung war. Dazu war ein Toleranzbereich um die Spannung definiert, die der Position der senkrechten Linie entsprach. Die Breite des Toleranzbereichs entsprach dem zweifachen Kreisdurchmesser. Kreis und Linie galten dann als nicht mehr in Dekkung, wenn der Kreismittelpunkt außerhalb des Toleranzbereichs lag.

Beginn und Ende der Bewegung nach dem Sprung der Linie auf die neue Zielposition wurden mit Hilfe des Beschleunigungssignals definiert. Die Bewegung galt als begonnen, wenn dieses Signal einen Toleranzbereich verließ, dessen Grenzen Drehbeschleunigungen von ±57.25 Grad/Sekunde-Quadrat entsprachen. Sobald das Beschleunigungssignal diesen Toleranzbereich anschließend für 0.5 Sekunden nicht mehr verlassen hatte, galt die Bewegung als beendet (vgl. Abb. 4, S. 62).

Die Pausen zwischen den einzelnen Bewegungen in der

Kontrollgruppe begannen dann, wenn das Beschleunigungs-Kriterium für das Ende der Bewegung erfüllt war. In der Experimentalgruppe dagegen begann die Pause zwischen der bequemen Bewegung nach links und der nächsten Standardbewegung bereits dann, wenn der Kreismittelpunkt in dem in Abbildung 1 angedeuteten Toleranzbereich um die Position der senkrechten Linie eingetreten war. Die Pausen P1/P2 und P3 in Abbildung 1 sind daher nicht vergleichbar, denn die längere Zeit für die Pause P3 schließt einen Teil der "bequemen" Bewegung ein.

Die Steuerung des Versuchsablaufs erfolgte automatisch. Die dazu benötigte Information wurde zum Teil von einem Lochstreifen gelesen (z.B. nächste Zielposition, Dauer der Vorperiode), zum Teil wurde sie durch die analogen Signale bereitgestellt (z.B. Bewegungsbeginn und -ende).

Die in Abbildung 1 genannten unterschiedlichen Pausenlängen von 1.8 bzw. 2.2 Sekunden hängen mit dem Einlesen der Information vom Lochstreifen zusammen; jede fünfte Pause war um 0.4 Sekunden verlängert, da zwei zusätzliche Steuerzeichen auf dem Lochstreifen zu überlesen waren.

Der automatische Ablauf des Versuchs wurde vereinzelt unterbrochen, nämlich dann, wenn ein Schreibversuch auf dem Magnetband mißlang. In diesen relativ seltenen Fällen mußte der Versuch für etwa eine halbe bis eine Minute unterbrochen werden, um den aufgetretenen Fehler zu beseitigen.

Auswertung: Im letzten Kapitel wurde ausgeführt, daß es für die in dieser Arbeit behandelte Frage nach der selektiven Beeinflussung willkürlicher Bewegungen notwendig ist, Einzelheiten des Verlaufs der Zielbewegungen zu erfassen. Aus den dort beschriebenen Überlegungen zur Bewegungszeit ergibt sich, daß auch für diesen Versuch die Bewegungszeit allein als abhängige Variable nicht geeignet ist.

Aus diesem Grunde wurden die Bewegungen durch mehrere Variablen gekennzeichnet, die verschiedene Bewegungsabschnitte betreffen. Eine Einteilung der gezielten Bewegung in Abschnitte kann einfach danach erfolgen, ob

jeweils die Agonisten-Kräfte oder Antagonisten-Kräfte überwiegen. Da die Summe der Kräfte von Agonist und Antagonist bei den hier untersuchten einfachen Beugungen und Streckungen eines Gelenks näherungsweise der Drehbeschleunigung proportional ist (vgl. T a y l o r & B i r m i n g h a m, 1948), geht die Bestimmung der Variablen zur Kennzeichnung jeder Bewegung von deren Beschleunigungsverlauf aus. Bei Überwiegen der Agonisten-Kräfte sind die Beschleunigungen positiv, bei Überwiegen der Antagonisten-Kräfte negativ (Bremsung der Bewegung).

Die maximalen positiven und negativen Werte der Beschleunigungen in den einzelnen Abschnitten überwiegender Agonisten- bzw. Antagonisten-Aktivität werden im folgenden kurz als "Maxima" bezeichnet. Die Dauer jedes solchen Abschnitts kann durch die Differenzen zwischen den Zeitpunkten von je zwei aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen der Beschleunigungs-Zeit-Kurve bestimmt werden. Da solche Differenz-Variablen jedoch in der Regel recht unzuverlässig sind, wurden nur die Zeitpunkte der einzelnen Nulldurchgänge relativ zum Bewegungsbeginn verwendet. Zusammen mit den Zeitpunkten der Maxima werden sie im folgenden als "ausgewählte Zeitpunkte" bezeichnet.

Abbildung 4 zeigt die bisher genannten Variablen - Bewegungszeit, Maxima und ausgewählte Zeitpunkte - am Beispiel eines Beschleunigungsverlaufs.

Nulldurchgänge wurden nur dann als Nulldurchgang gewertet, wenn die Beschleunigungswerte den in Abbildung 4 eingezeichneten Toleranzbereich, der Drehbeschleunigungen des Unterarms von ±57.25 Grad/Sekunde-Quadrat entsprach, in einer Richtung durchliefen, also nicht dann, wenn Austritt und Eintritt in den Toleranzbereich in dieselbe Richtung erfolgten. Zwischen je zwei Nulldurchgängen wurde nur der jeweils absolut größte Wert als Maximum erfaßt; die Maxima sind folglich nicht alle Maxima im mathematischen Sinne, von denen zwischen zwei Nulldurchgängen mehrere liegen können.

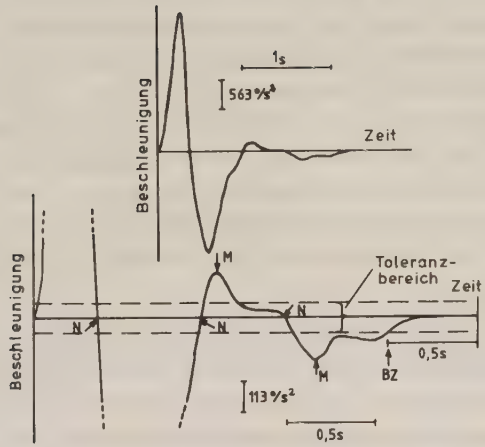


Abbildung 4: Beispiel eines Beschleunigungsverlaufs

N: Nulldurchgang
M: Maximum
BZ: Bewegungszeit

(weitere Erläuterungen im Text)

Die Zahl der Nulldurchgänge ist bei jeder Bewegung verschieden. Für die Auswertung wurden nur die ersten drei Nulldurchgänge und Maxima berücksichtigt, die bei praktisch allen Bewegungen vorhanden sind.

Neben der Kennzeichnung der einzelnen Bewegungsabschnitte durch die bisher genannten Variablen ist eine generellere Kennzeichnung der beiden Aspekte des zeitlichen Ablaufs und der entwickelten Kräfte für die Gesamt-Bewegung wünschenswert. Dafür bietet sich die Autokorrelationsfunktion an. Der Wert dieser Funktion bei einer Verzögerung von Null ist identisch mit der Varianz des Beschleunigungsverlaufs und kennzeichnet zusammenfassend die Größe der Beschleunigungen bei der Bewegung bzw. die bei der Bewegung aufgewendete Kraft. Die Halbwertszeit der Autokorrelationsfunktion - das ist die Verzögerung,

bei der der Wert der Funktion halb so groß ist wie ihr Maximum - erlaubt eine Kennzeichnung der Frequenzzusammensetzung des Beschleunigungssignals (F i t t s u.a., 1956): Sie ist umso kleiner, je höher die in diesem Signal enthaltenen Frequenzen sind (vgl. S c h l i t t, 1960, S. 165-166, 176-178, 186). Die Frequenzen im Beschleunigungssignal sind dann größer, wenn die Aktivitäten von Agonist und Antagonist in schnellerer Abfolge alternieren.

Abbildung 5 illustriert die beiden Variablen - Varianz und Halbwertszeit - am Beispiel der Autokorrelationsfunktionen einer schnellen und einer langsamen Bewegung. Der Ordinatenabschnitt ist jeweils die Varianz. Sie ist bei der schnelleren Bewegung größer als bei der langsamen (beachte die unterschiedlichen Ordinaten-Maßstäbe in Abbildung 5!). Die unterhalb der Abszisse markierte Halbwertszeit ist bei der schnelleren Bewegung kleiner.

Die Werte der Autokorrelationsfunktion wurden für Verzögerungen von 0, 20, 40, ..., 220 Millisekunden berechnet. Der Wert, der dem halben Maximum entsprach,

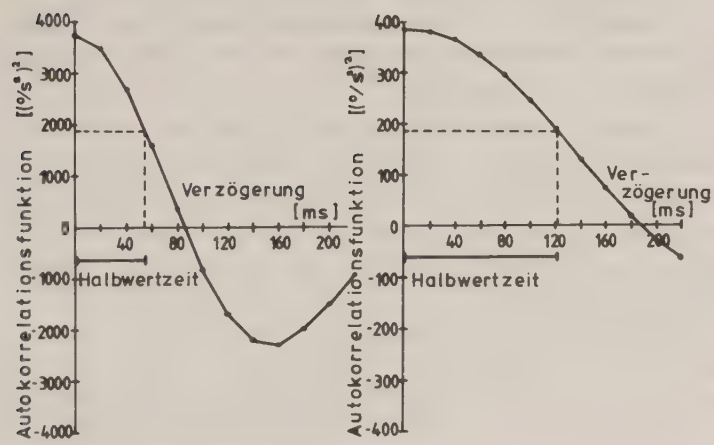


Abbildung 5: Beispiele für Autokorrelationsfunktionen

gehörte in der Regel nicht zu den berechneten Werten. Die Halbwertszeit wurde dann durch lineare Interpolation zwischen den beiden benachbarten berechneten Werten bestimmt.

Die letzte Variable zur Beschreibung der einzelnen Bewegung diente einer generellen Kennzeichnung der Leistung. Es handelt sich bei dieser Variablen um das Fehlerintegral. Das ist das Integral der absoluten Abweichungen zwischen der Position des Zielpunktes und der Position des Kreises nach der Zeit während der Bewegung. (Da die Positionen nur zu diskreten Zeitpunkten registriert wurden, wurde genau genommen eine Summe dieser absoluten Abweichungen berechnet. Der Begriff "Fehlerintegral" ist jedoch geläufig und soll daher auch hier verwendet werden.)

Zur Erfassung der Variabilität aufeinanderfolgender Bewegungen wurden Korrelationen zwischen den Beschleunigungsverläufen berechnet. Da diese Korrelationen umso größer sind, je weniger sich die Beschleunigungsverläufe zweier aufeinanderfolgender Bewegungen unterscheiden, soll von der "Bewegungsstabilität" gesprochen werden. Beispiele für solche Korrelationen sind bei H e u e r (1973, S. 45) angegeben. Die Korrelationen wurden jeweils über die kürzere der Bewegungszeiten der miteinander korrelierten Bewegungen berechnet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die abhängigen Variablen, die für jede einzelne Bewegung bzw. für jedes Paar aufeinanderfolgender Bewegungen bestimmt wurden. Für die weitere Auswertung wurden Mittelwerte dieser Variablen verwendet, die über die jweils 100 registrierten Bewegungen berechnet wurden.

Tabelle 1: Übersicht über die abhängigen Variablen

Name	Kurzbeschreibung
Fehlerintegral	Summe der absoluten Abweichungen zwischen Arm- und Zielposition
ausgewählte Zeitpunkte	Zeitpunkte der Maxima und Nulldurchgänge (6 Variablen)
Halbwertszeit	Verzögerung, bei der die Autokorrelationsfunktion auf ihr halbes Maximum abgesunken ist
Bewegungszeit	
Maxima	absolut größte Beschleunigungswerte zwischen je zwei Nulldurchgängen (3 Variablen)
Varianz	Varianz der Beschleunigungswerte
Bewegungsstabilität	Korrelation zwischen den Beschleunigungsverläufen aufeinanderfolgender Bewegungen

In folgenden Fällen wurden Bewegungen für die Berechnung der Mittelwerte nicht berücksichtigt:

1) Bei der Aufzeichnung waren Fehler in der Organisation der Daten auf dem Magnetband aufgetreten.

2) Der Aufzeichnungsbereich (±5750 Grad/Sekunde-Quadrat bei den Beschleunigungen) wurde für mehr als 20 Millisekunden überschritten, oder der Toleranzbereich von ±57.25 Grad/Sekunde-Quadrat wurde nicht wenigstens einmal in positiver und negativer Richtung verlassen.

3) Die Bewegung begann nicht mit einer großen Beschleunigung; dann tritt entweder vor dem ersten großen Beschleunigungs-Maximum, wie es in Abbildung 4 gezeigt ist, noch ein kleineres auf, oder der Zeitpunkt des ersten Maximums liegt sehr spät. Eine Bewegung blieb unberücksichtigt, wenn er später als 200 Millisekunden nach Bewegungsbeginn lag.

4) Die Bewegung begann in die verkehrte Richtung.

5) Die Zielabweichung am Ende der Bewegung war größer als ein Viertel der Bewegungsweite. Das kam dann vor, wenn in der Experimentalgruppe die Bewegung nach links bereits vor dem Sprung der senkrechten Linie begann. Die Rückbewegung wurde in diesen Fällen als Teil der Standardbewegung registriert, da das Beschleunigungs-Kriterium für das Ende der Standardbewegung nach rechts vorher nicht erfüllt worden war.

Wenn eine Bewegung ausfiel, wurde für die Berechnung der Bewegungsstabilität die jeweils nächste Bewegung verwendet.

Ergebnisse

Der Einfluß der unterschiedlich schnellen Zielbewegungen nach links auf den Verlauf der Standardbewegungen sollte zu Unterschieden zwischen Experimental- und Kontrollgruppe in den abhängigen Variablen führen; folglich wurden die Mittelwerte der einzelnen Variablen im dritten Versuchsblock beider Versuchsgruppen miteinander verglichen.

Diejenigen Variablen, die die einzelnen Abschnitte überwiegender Agonisten- bzw. Antagonisten-Aktivität kennzeichnen - das sind die ausgewählten Zeitpunkte und die Maxima - wurden für den Vergleich jeweils zu Vektoren mit sechs bzw. drei Werten zusammengefaßt. Für den Vergleich wurde dann jeweils ein multivariater statistischer Test verwendet, so daß die Zahl der Tests nicht allzu groß wurde.

Zur Kennzeichnung der Leistung bei Ausführung der Standardbewegungen wurde das Fehlerintegral verwendet; der Wert dieser Variablen ist umso kleiner, je besser die Leistung im Sinne der Instruktion auf "möglichst schnelle und genaue Bewegungen" ist. In der Kontrollgruppe betrug der Mittelwert bei dieser Variablen 114 (willkürliche Einheiten), in der Experimentalgruppe aber nur 94. Der Unterschied ist auf dem 5%-Niveau signifikant (U-Test; S a c h s, 1969, S. 293-300). Die Leistung ist demnach in der Experimentalgruppe besser als in der Kontrollgruppe.

Die zeitliche Ablauf der Standardbewegungen wurde durch die ausgewählten Zeitpunkte und zusammenfassend durch die Halbwertszeit erfaßt. Die Mittelwerte der ausgewählten Zeitpunkte in beiden Gruppen sind in Tabelle 2 angegeben: sie sind in der Experimentalgruppe durchgängig kleiner. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist auf dem 5%-Niveau signifikant (multivariate Verallgemeinerung des H-Test; P u r i & S e n, 1971, S. 181-195; siehe Anhang).

Tabelle 2: Gruppenmittelwerte der ausgewählten Zeitpunkte

Variable[1]	K-Gruppe[2]	E-Gruppe[3]	Differenz
1. Maximum	0.119	0.098	0.021
1. Nulldurchgang	0.266	0.216	0.050
2. Maximum	0.414	0.327	0.087
2. Nulldurchgang	0.699	0.596	0.103
3. Maximum	0.776	0.668	0.108
3. Nulldurchgang	0.888	0.779	0.109

1) Einheit: s 2) Kontrollgruppe 3) Experimentalgruppe

Entsprechend den in der Experimentalgruppe früher liegenden ausgewählten Zeitpunkten ist auch die Halbwertszeit in der Experimentalgruppe kleiner. Ihr Mittelwert beträgt 0.086 Sekunden gegenüber einem Mittelwert von 0.108 Sekunden in der Kontrollgruppe. Dieser Mittelwertsunterschied ist jedoch statistisch nicht bedeutsam; die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt zwischen 0.10 und 0.20 (U-Test).

Der Mittelwert der Bewegungszeit beträgt 0.974 Sekunden in der Experimentalgruppe und 1.066 Sekunden in der Kontrollgruppe; beim Vergleich dieser Mittelwerte mit Hilfe des U-Tests ergibt sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit unter 0.10.

Betrachtet man die Mittelwertsdifferenzen zwischen beiden Gruppen bei den ausgewählten Zeitpunkten und bei der Bewegungszeit, so wird deutlich, daß sich die beiden Gruppen vor allem in der ersten Beschleunigungs-Bremsphase unterscheiden. Diese Phase ist in der Experimentalgruppe ca. 0.1 Sekunde früher beendet als in der Kontrollgruppe, wobei sowohl die Beschleunigungs- wie auch die Bremsphase in der Experimentalgruppe um jeweils ca. 0.05 Sekunden kürzer ist (siehe Tabelle 2, rechte Spalte). In den nachfolgenden Abschnitten unterscheiden sich die Standardbewegungen in beiden Gruppen nur noch geringfügig: Am Ende der Bewegung beträgt die Zeitdifferenz 0.092 Sekunden und ist somit nur wenig von der Differenz am Ende der ersten Beschleunigungs-Bremsphase verschieden.

Die Größe der Beschleunigungen bei der Ausführung der Standardbewegungen, also die Größe der aufgewendeten Kräfte, wird durch die Beschleunigungsmaxima und zusammenfassend durch die Varianz erfaßt. Die Mittelwerte der Maxima in beiden Gruppen sind in Tabelle 3 angegeben; sie sind in der Experimentalgruppe stets größer als in der Kontrollgruppe. Obwohl die Mittelwertsdifferenzen recht groß sind, ist der Unterschied zwischen beiden Gruppen nicht signifikant (multivariate Verallgemeinerung des H-Test). Dabei dürften die recht großen interindividuellen Unterschiede in der Größe der Beschleunigungsmaxima von Bedeutung sein; die Standardabweichungen sind in Tabelle 3 jeweils in Klammern angegeben.

Tabelle 3: Gruppenmittelwerte der Maxima; Standardabweichungen in Klammern

Variable[1]	K-Gruppe	E-Gruppe
1. Maximum	1372(994)	2045(1153)
2. Maximum	1031(817)	1548(1002)
3. Maximum	170(109)	200 (118)

1) Einheit: $^{o}/s^{2}$

Auch die Mittelwerte der Varianz in beiden Gruppen - in der Experimentalgruppe beträgt er 2541 $(^{o}/s^{2})^{2}$, in der Kontrollgruppe 1302 $(^{o}/s^{2})^{2}$ - sind nicht signifikant voneinander verschieden; allerdings liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit hier unter 0.10 (U-Test).

Die Mittelwerte der Bewegungsstabilität sind in beiden Gruppen nahezu identisch. In der Experimentalgruppe beträgt der Mittelwert 0.888, in der Kontrollgruppe 0.889. Der Unterschied ist nicht signifikant (U-Test).

Diskussion

Den Einfluß einer "bequemen" Rückbewegung auf den Verlauf einer "möglichst schnellen und genauen" Zielbewegung kann man folgendermaßen zusammenfassend beschreiben: Die aufgewendeten Kräfte in Richtung und Gegenrichtung sind größer, und die Dauer der Kraftanwendungen ist kürzer, und zwar vor allem in der jeweils ersten Tätigkeitsperiode von Agonist und Antagonist. Als Folge davon ist die Leistung dann besser, wenn die Rückbewegungen "bequem" auszuführen sind und nicht ebenfalls "möglichst schnell und genau".

Bei dieser Zusammenfassung wird darüber hinweggegangen, daß die Unterschiede zwischen beiden Versuchsgruppen weder bei den Beschleunigungsmaxima noch bei der Varianz signifikant ausgefallen sind. Wegen der großen individuellen Differenzen dürfte ein Mittelwertsunterschied zwischen unabhängigen Gruppen bei diesen Variablen nur mit recht großen Stichproben nachzuweisen sein. Das Fehlen eines statistisch bedeutsamen Unterschiedes bei jeweils 12 Vpn in beiden Gruppen kann daher nicht allzu hoch bewertet werden, zumal die folgende Überlegung dafür spricht, daß tatsächlich ein Unterschied vorliegt, der nur aufgrund zu geringer Testschärfe in diesem Experiment nicht nachgewiesen werden konnte.

Ein solcher Unterschied müßte deshalb vorhanden sein, weil die erste Beschleunigungs-Bremsphase in der Experimentalgruppe in wesentlich kürzerer Zeit ablief als in der Kontrollgruppe. Aus folgendem Grund sollte eine kürzere erste Beschleunigungs-Bremsphase mit größeren Beschleunigungsmaxima einhergehen: Durch zweimalige Integration der Beschleunigungs-Zeit-Kurve nach der Zeit ergibt sich die Weite der Bewegung, wobei die großen Beschleunigungswerte in der ersten Beschleunigungs-Bremsphase den größten Teil zum Wert dieses Integrals beitragen. Die vorgegebene Bewegungsweite war in beiden Versuchsgruppen gleich. Damit auch die tatsächlichen Bewegungsweiten etwa gleich sind, müssen also die Beschleunigungswerte, die aufintegriert werden, größer sein, wenn die Zeit, über die integriert wird, kleiner wird.

Das Ergebnis dieses Versuchs ist der Erwartung, daß der Verlauf einer Zielbewegung an den Verlauf einer vorhergehenden anderen Zielbewegung angenähert wird, genau entgegengesetzt: eine vorhergehende langsame Bewegung führt nicht dazu, daß der Kraftaufwand bei einer nachfolgenden Bewegung ebenfalls geringer ist, sondern er ist im Gegenteil größer.

Einfluß der unterschiedlichen Zeitintervalle: Auf der Suche nach einer Erklärung für das unerwartete Ergebnis erscheint als naheliegendster Gedanke, daß es etwas mit den Gruppenunterschieden in den Zeitintervallen zwischen den Bewegungen zu tun haben könnte. Die von der Vp auszuführende Bewegungsfolge dürfte von ihr gegliedert werden, und die Art dieser Gliederung dürfte von den Pausen zwischen den Bewegungen abhängen. In der Experimentalgruppe ist nun die Pause zwischen Standardbewegung und Bewegung nach links relativ kurz, die zwischen der Bewegung nach links und der nächsten Standardbewegung aber relativ lang. Als Folge davon könnte die Vp Gruppierungen bilden, deren erste Bewegung die Standardbewegung ist und deren zweite die langsame Rückbewegung. Die Standardbewegung als erste Bewegung der Gruppe könnte dann besonders "betont" werden, ähnlich wie der erste Schlag beim Schlagen eines 2/4-Taktes besonders betont wird. In der Kontrollgruppe sind dagegen die Zeitintervalle zwischen den Bewegungen nicht systematisch verschieden, so daß Gruppierungen hier eine viel geringere Rolle spielen dürften und zudem bei verschiedenen Vpn eher verschieden sein sollten.

Um den möglichen Einfluß der unterschiedlichen Zeitintervalle zu prüfen, die die Bewegungsverläufe entweder dadurch beeinflussen könnten, daß sie bestimmte Gruppierungen der Bewegungen nahelegen, oder aber auch auf andere Art, wurden vier weitere Gruppen mit jeweils 12 männliche Vpn verwendet. Die Bewegungsfolge war in allen Gruppen identisch mit der in der Kontrollgruppe, nur die Pausenlängen wurden variiert.

In zwei der zusätzlichen Gruppen wurde die Pause vor der Standardbewegung (P1 in Abbildung 1) auf 7.8 bzw. 8.2 Sekunden und auf 13.8 bzw. 14.2 Sekunden verlängert; die mittlere Dauer der Versuchsdurchgänge betrug 11.6 und 17.7 Sekunden. Versuchsdurchführung und Auswertung entsprachen bei diesen beiden Gruppen ansonsten der Kontroll-

gruppe. Die abhängigen Variablen in allen drei Gruppen wurden mit Hilfe von H-Tests (S a c h s, 1969, S. 302-306) und multivariaten Verallgemeinerungen des H-Test verglichen. Bei keiner der Variablen zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Gruppen oder auch nur eine Tendenz dazu. Danach sollten die unterschiedlichen Zeitintervalle in der Experimental- und Kontrollgruppe für das Zustandekommen des unerwarteten Ergebnisses keine Rolle gespielt haben.

In diesen drei Gruppen - Kontrollgruppe und zwei zusätzliche Gruppen - war allerdings nicht nur das Verhältnis der Pausen vor der Standardbewegung und der Rückbewegung (P1 und P2 in Abbildung 1) verschieden, sondern auch die Gesamtdauer jedes Versuchsdurchgangs. Das Fehlen einer Wirkung der Pausenlänge könnte damit zusammenhängen. Daher wurde in den zwei weiteren zusätzlichen Gruppen mit ebenfalls jeweils 12 männlichen Vpn nur das Pausenverhältnis variiert.

In einer der bereits genannten zusätzlichen Gruppen war die Gesamtpausenzeit von ca. 16 Sekunden so aufgeteilt, daß die Pause vor der Standardbewegung 13.8 bzw. 14.2 Sekunden betrug und die vor der Rückbewegung 1.8 bzw. 2.2 Sekunden. In den beiden weiteren zusätzlichen Gruppen war diese Verteilung einmal umgekehrt - 1.8 bzw. 2.2 Sekunden vor der Standardbewegung und 13.8 bzw. 14.2 Sekunden vor der Rückbewegung - und zum anderen gleichmäßig: vor jeder der beiden Bewegungen dauerte die Pause 7.8 bzw. 8.2 Sekunden. (Mittlere Dauer der Versuchsdurchgänge in den drei Gruppen: 17.7, 17.1 und 16.3 Sekunden.)

In diesen drei Gruppen folgten also einmal Standard- und Rückbewegung mit nur kurzer Pause aufeinander, ein andermal aber Rück- und Standardbewegung. In der dritten Gruppe war das Zeitintervall zwischen den Bewegungen stets etwa gleich. Sofern die Gruppierung von Bewegungen einen Einfluß auf ihren Verlauf hat, sollte er unter diesen Be-

dingungen sichtbar werden. Ein Vergleich der abhängigen Variablen zwischen den drei Gruppen ergab jedoch ebenfalls keinen signifikanten Unterschied und auch keine Tendenz dazu.

Nach den Ergebnissen mit diesen zusätzlichen Gruppen scheint eine Interpretation der unerwarteten Ergebnisse dieses Versuchs im Hinblick auf die unterschiedlichen Zeitintervalle zwischen den Bewegungen nicht gerechtfertigt.

Einfluß motivationaler Faktoren: Das Ergebnis dieses Versuchs ist m.E. kaum anders interpretierbar als durch den Einfluß motivationaler Faktoren. Aus irgendwelchen Gründen müssen sich die Vpn in der Experimentalgruppe bei der Ausführung "möglichst schneller und genauer" Bewegungen stärker angestrengt haben als die Vpn der Kontrollgruppe. Als Ursachen solcher Motivationsunterschiede dürften in erster Linie die folgenden in Frage kommen:

1) Das Instruktionsverständnis mag in beiden Gruppen verschieden gewesen sein. In der Experimentalgruppe war nämlich in der Instruktion sowohl von "möglichst schnellen" wie auch von "bequemen" Bewegungen die Rede, in der Kontrollgruppe aber nur von "möglichst schnellen". Die Gegenüberstellung zweier Bewegungsgeschwindigkeiten in der Instruktion mag dazu geführt haben, daß die Vpn der Experimentalgruppe unter "möglichst schnellen" Bewegungen schnellere Bewegungen verstanden haben als die der Kontrollgruppe.

2) Da auch "bequeme" Bewegungen nicht sehr langsam ablaufen, mögen die Vpn die "möglichst schnellen" Bewegungen besonders schnell ausgeführt haben, damit der Unterschied zwischen beiden Geschwindigkeiten für sie deutlich erkennbar wurde.

3) Unabhängig von den Unterschieden in der Instruktion für beide Gruppen mag es sein, daß dann, wenn Ziel-

bewegungen relativ langsam auszuführen sind, andere Bewegungen gewissermaßen kompensatorisch mit umso größerer Geschwindigkeit ausgeführt werden.

V e r s u c h 2

Fragestellung

In diesem Versuch sollen beide Teile der Hypothese selektiver Beeinflussung geprüft werden.

Der Einfluß einer Zielbewegung auf den Verlauf einer nachfolgenden anderen Zielbewegung soll hier mit anderen Bewegungen untersucht werden als im ersten Versuch, und zwar mit solchen, bei denen motivationale Faktoren nach Möglichkeit keine Rolle für die Ergebnisse spielen. Dazu scheinen Zielbewegungen unterschiedlicher Weite geeignet, denn bei diesen Bewegungen liegen die im letzten Abschnitt genannten möglichen Ursachen für das Zustandekommen von Unterschieden in der Motivation zur Ausführung "möglichst schneller und genauer" Bewegungen nicht vor. Zum einen nämlich werden die Bewegungen nicht durch Instruktion variiert, so daß unterschiedliches Instruktionsverständnis keine Rolle spielen kann, und zum anderen können Zielbewegungen verschiedener Weiten hinsichtlich des Kriteriums "möglichst schnell und genau" auch nicht eindeutig als besser oder schlechter klassifiziert werden; das wird noch näher erläutert werden.

Dem Vorteil, daß bei der Verwendung von Zielbewegungen unterschiedlicher Weite motivationale Faktoren keine Rolle für das Ergebnis spielen sollten, steht ein Nachteil gegenüber: Da die Bewegungsziele nicht, wie im ersten Versuch, stets gleich sind, kann der Einfluß auf den Verlauf der nachfolgenden Zielbewegung dadurch zustande kommen, daß das Bewegungsziel bei Bewegungsbeginn noch nicht genau lokalisiert ist und seine innere Repräsentation systematisch verfälscht. Solche Verfälschungen sollten jedoch durch einen geeigneten Versuchsaufbau verhindert werden können; die dazu getroffenen Maßnahmen werden später

erläutert werden.

Eine Hypothese über die genaue Art und Weise, auf die der Verlauf einer Zielbewegung durch eine vorhergehende Bewegung größerer oder kleinerer Weite beeinflußt werden soll, ist nicht möglich. Man kann nämlich nicht erwarten, daß der Verlauf der nachfolgenden Bewegung in jeder Hinsicht dem Verlauf der vorhergehenden Bewegung ähnlich wird. Der Grund dafür ist der folgende.

Die Weite einer gezielten Bewegung ergibt sich, wie bereits gesagt wurde, durch zweimalige Integration der Beschleunigungs-Zeit-Kurve nach der Zeit. Bei einer weiteren Bewegung wird nun die Zeit, über die integriert wird, (Bewegungszeit) etwas länger (S e a r l e & T a y l o r, 1948; T a y l o r & B i r m i n g h a m, 1948; B r o w n & S l a t e r - H a m m e l, 1949; S c h m i d t k e, 1960), sowie ebenfalls die Dauer der ersten Beschleunigungsphase (T a y l o r & B i r m i n g h a m, 1948). Gleichzeitig werden auch die maximalen Beschleunigungswerte größer sowie die Maxima der ersten Ableitung des Beschleunigungsverlaufs nach der Zeit: Bei weiteren Bewegungen sind die Kräfte in Richtung und Gegenrichtung also größer, werden über jeweils etwas längere Zeit angewendet, und ihr Anstieg und Absinken erfolgt schneller (T a y l o r & B i r m i n g h a m, 1948). (Hinsichtlich des Kriteriums "möglichst schneller" Bewegungen ist demnach die Leistung bei weiteren Bewegungen besser, wenn man die maximale oder mittlere Geschwindigkeit betrachtet; betrachtet man dagegen die Gesamtdauer, ist die Leistung bei kürzeren Bewegungen besser. "Besser" und "schlechter" ist bei diesen Bewegungen also nicht eindeutig festgelegt.)

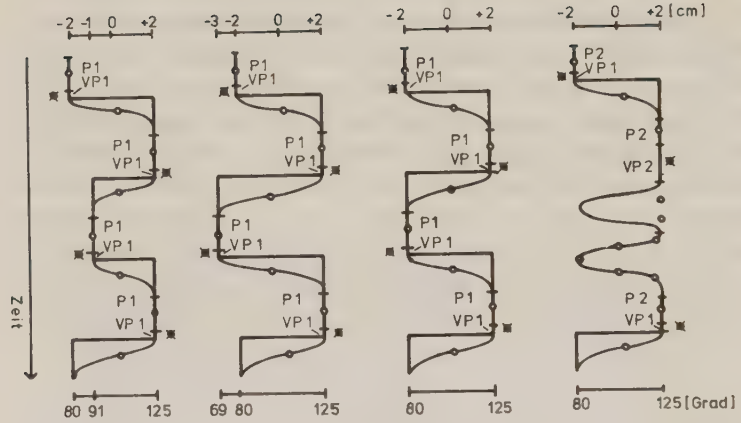
Wenn nun zum Beispiel eine Zielbewegung größerer Weite so auf eine nachfolgende Bewegung kleinerer Weite wirken würde, daß deren Beschleunigungsmaxima sowohl größer werden wie auch später im Bewegungsverlauf liegen, müßte die Bewegung zu weit ausfallen. Wegen der vorgege-

benen Weite müßte eine Annäherung der Beschleunigungsmaxima an die bei der vorhergehenden Bewegung größerer Weite durch deren frühere Lage im Bewegungsverlauf kompensiert werden, und umgekehrt eine Annäherung der zeitlichen Lage der Maxima und Nulldurchgänge an die bei der weiteren Bewegung durch kleinere Beschleunigungsmaxima. Das entsprechende gilt für den Einfluß einer Zielbewegung kleinerer Weite auf den Verlauf einer nachfolgenden Bewegung größerer Weite. Darüber, ob nun eine Annäherung hinsichtlich der Zeitpunkte oder hinsichtlich der Maxima auftritt, scheinen keine begründeten Erwartungen möglich zu sein. Zu erwarten ist jedoch, daß die Bewegungsstabilität geringer ist, wenn Bewegungen unterschiedlicher Weite auszuführen sind, als dann, wenn alle Bewegungen dieselbe Weite haben; die Begründung dafür wurde bereits beim ersten Versuch genannt.

In diesem Versuch soll auch der zweite Teil der Hypothese selektiver Beeinflussung willkürlicher Bewegungen geprüft werden: eine Sinusbewegung soll keinen Einfluß auf den Verlauf einer nachfolgenden Zielbewegung haben. Der Unterschied zwischen den Verläufen einer Sinusbewegung und einer Zielbewegung mit etwa gleichen Bewegungszeiten ist offensichtlich. Wenn wider Erwarten doch ein Einfluß auftreten sollte, müßten die Beschleunigungsmaxima kleiner sein und die ausgewählten Zeitpunkte später liegen.

Methode

Die Versuchsanordnung (Apparatur, Versuchsablauf, Auswertung) bei diesem Versuch war identisch mit der des ersten Versuchs, abgesehen vom Aufbau der einzelnen Versuchsdurchgänge. Der Ablauf eines einzelnen Durchgangs war in den vier Gruppen dieses Experiments unterschiedlich.



Gruppe mit kürzerer interpolierter Zielbew.

Gruppe mit weiterer interpolierter Zielbew.

Kontrollgruppw

Gruppe mit interpolierter Sinusbew.

Abbildung 6: Ablauf eines Versuchsdurchgangs

dicke Linie: Positionen der Vorlage
dünne Linie mit Kreisen: Bewegung der Vp

obere Skala: Positionen auf der Anzeige
untere Skala: Armpositionen (Winkel zwischen Ober- und Unterarm)

Dauer der Pausen P1: 1.5 oder 1.9 s
P2: 1.1 oder 1.5 s
Dauer der Vorperioden Vp1: 0.2, 0.4 oder 0.6 s
Vp2: 0.4 - 2.7 s

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich ist, war die erste Bewegung in allen vier Gruppen gleich; diese Bewegung ist die Standardbewegung, die registriert wurde. Auch die letzte Bewegung jedes Durchgangs - das ist die Bewegung, die der Standardbewegung des nächsten Durchgangs unmittelbar vorausgeht - war in den vier Gruppen gleich. Die anderen Bewegungen waren unterschiedlich.

In der Kontrollgruppe waren stets Zielbewegungen gleicher Weite auszuführen. In zwei weiteren Gruppen folgten auf die Standardbewegung Zielbewegungen größerer oder kleinerer Weite. In der vierten Gruppe schließlich war nach der Standardbewegung eine sinusförmige Bewegung auszuführen. Die Weiten der Bewegungen sowie die Dauer der einzelnen Zeitintervalle sind Abbildung 6 zu entnehmen. Alle Zielbewegungen sollten "möglichst schnell und genau" ausgeführt werden, bei der Sinusbewegung waren Kreis und senkrechte Linie möglichst immer in Deckung zu halten.

Die in Abbildung 6 schematisch dargestellte Bewegungsfolge in jedem einzelnen Versuchsdurchgang weist drei Merkmale auf, durch die systematische Abweichungen der inneren Repräsentation des Bewegungsziels für die Standardbewegung vom tatsächlichen Ziel verhindert werden sollten:

1) Die Bewegungsfolge ist sehr einfach; die Vp dürfte daher stets eine richtige Erwartung hinsichtlich des nächsten Bewegungsziels haben, so daß die genaue Lokalisation des Ziels kaum durch falsche Erwartungen beeinträchtigt werden kann.

2) Die Zielposition ist für alle Bewegungen nach rechts - das ist die Richtung der Standardbewegung - identisch.

3) Vor jeder Standardbewegung liegt eine Zielbewegung gleicher Weite, aber in entgegengesetzte Richtung. (Diese Rückbewegung ist die jeweils letzte Bewegung in einem Durchgang und geht der Standardbewegung des nächsten Durchgangs unmittelbar voraus.)

Zur Begründung der unter 2) und 3) genannten Maßnahmen möchte ich etwas weiter ausholen. Die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls kann im Prinzip zweierlei Information enthalten: Zum einen kann sie die Zielposition für die Bewegung angeben - in diesem Sinne wurde der Begriff bisher verwendet -, zum anderen aber auch die Weite der Bewegung, also die Differenz zwischen Start- und Zielposition. In Untersuchungen dazu, welche Information die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls enthält, wird in der Regel eine Anordnung verwendet, die auf P o s n e r (1967) zurückgeht. Dabei wird eine Bewegung mit bestimmter Weite und bestimmter Zielposition ausgeführt. Nach einer kurzen Pause ist die Bewegung von einer anderen Startposition aus zu reproduzieren, und zwar entweder die Distanz oder die Zielposition. In solchen Versuchen erweist sich die Reproduktion der Zielposition generell als genauer als die Reproduktion der Distanz (P o s n e r, 1967; M a r t e n i u k u.a., 1972; M a r t e n i u k & R o y, 1972; L a a b s, 1974; M a r t e n i u k, 1973; S t e l m a c h u.a., 1975). R u s s e l l (1976) geht aufgrund dieser Ergeb-

nisse davon aus, daß die Zielposition subjektiv repräsentiert ist und nicht die Distanz.

Sofern das zutrifft, sollte durch die gleichen Zielpositionen für alle Bewegungen von links nach rechts verhindert werden, daß die Zielposition für die Standardbewegungen in systematischer Weise zunächst falsch lokalisiert wird, da die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls der letzten Bewegung in dieselbe Richtung ja dieselbe Zielposition enthält. (Die auf der linken Seite des Bildschirms gelegenen Zielpositionen sollten die Lokalisation der rechts gelegenen Zielposition kaum beeinflussen können.) Sofern die innere Repräsentation des Bewegungs-Solls auch Angaben über die Weite der Bewegung enthält, sollten diese bei der Standardbewegung kaum noch zu einer Verfälschung führen können, da die jeweils vorhergehende Bewegung dieselbe Weite hat.

Die vier Versuchsgruppen umfaßten jeweils 12 männlichen Vpn; es handelte sich um Studenten verschiedener Fachrichtungen, die freiwillig und ohne Bezahlung am Versuch teilnahmen. Ihr Alter betrug 19 bis 30 Jahre (Median: 23 Jahre).

Zur Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen sind noch zwei Erläuterungen notwendig.

1) Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, lag vor der Sinusbewegung eine längere Vorperiode (0.4 bis 2.7 Sekunden Dauer) als vor den Zielbewegungen (0.2, 0.4 oder 0.6 Sekunden). Das war aus technischen Gründen nicht zu umgehen, da der Funktionsgenerator unabhängig von der Versuchssteuerung arbeitete; nach dem Ende der minimalen Vorperiode von 0.4 Sekunden mußte daher mit dem Beginn der sinusförmigen Bewegung der senkrechten Linie gewartet werden, bis die Ausgangsspannung des Sinusgenerators einen Wert erreichte, der der Position der senkrechten Linie in der Pause entsprach.
2) Vor der Sinusbewegung wurde erst eine Periode der harmonischen Schwingung dargeboten, ohne daß die Vp der Linie mit dem Kreis folgen sollte. Durch diese Voranzeige sollte erreicht werden, daß die Bewegung der Vp möglichst genau der der senkrechten Linie entsprach. Ohne Voranzeige müßte die Vp zunächst hinter der Linie hinterhereilen, was zu größeren Abweichungen vom durch die Vorlage vorgegebenen Bewegungsverlauf führen könnte.

Die einzelnen Zeitintervalle waren so ausgewählt, daß die mittlere Dauer jedes Versuchsdurchgangs in den vier Gruppen etwa gleich war. Zur Kontrolle wurde die

Dauer jedes Durchgangs, wie auch im ersten Versuch, erfaßt. Die mittlere Dauer (ohne die Bewegungszeit für die Standardbewegung) betrug in der Kontrollgruppe 13.1 Sekunden, in der Gruppe mit kürzeren interpolierten Zielbewegungen 12.9 Sekunden, in der mit weiteren 13.5 Sekunden und in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen 13.4 Sekunden. Die zugehörigen Standardabweichungen waren 0.49, 0.30, 0.51 und 0.50 Sekunden.

Jeder einzelne Versuchsblock dauerte ca. 23 Minuten, der ganze Versuch etwa 1.5 Stunden.

Ergebnisse

Interpolierte Zielbewegungen anderer Weite: Wenn der erste Teil der Hypothese selektiver Beeinflussung richtig ist und interpolierte Zielbewegungen anderer Weite den Verlauf der Standardbewegungen beeinflussen, sollte dieser in den beiden Gruppen mit solchen interpolierten Bewegungen anders sein als in der Kontrollgruppe. Entsprechend wurden die Mittelwerte der abhängigen Variablen in den drei Gruppen miteinander verglichen.

Die Leistung bei den Standardbewegungen ist umso besser, je geringer die Weite der interpolierten Zielbewegungen ist. Der Mittelwert des Fehlerintegrals beträgt in der Gruppe mit kürzeren interpolierten Zielbewegungen 101 (willkürliche Einheiten), in der Kontrollgruppe 116 und in der Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen 120. Dieser Unterschied zwischen den drei Gruppen ist zwar nicht signifikant, aber die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt unter 0.10 (H-Test; S a c h s. 1969, S. 302-306).

Der zeitliche Ablauf der Standardbewegungen wird durch die ausgewählten Zeitpunkte, die Halbwertszeit und die Bewegungszeit charakterisiert. Die Mittelwerte der ausgewählten Zeitpunkte in den drei Gruppen sind in Tabelle 4 angegeben. Der Vergleich dieser Mittelwerts-Vektoren mit Hilfe der multivariaten Verallgemeinerung des H-Test ergibt ein signifikantes Ergebnis (Irrtumswahrscheinlichkeit unter 0.01). Bei kürzeren interpolierten Zielbewegungen liegen, bis auf den Zeitpunkt des ersten

Maximums, alle ausgewählten Zeitpunkte früher als in der Kontrollgruppe. Bei weiteren interpolierten Zielbewegungen ist der Unterschied zur Kontrollgruppe nicht bei allen sechs ausgewählten Zeitpunkten gleich: Während die Maxima später liegen als in der Kontrollgruppe, liegen die Nulldurchgänge früher. Mit Ausnahme des Zeitpunkts des zweiten Maximums sind die Unterschiede jedoch recht klein.

Tabelle 4: Gruppenmittelwerte der ausgewählten Zeitpunkte

Variable[1]	Differ.[2]	Grp.kiZ[3]	K-Gruppe[4]	Grp.wiZ[5]	Differ.[2]
1.Maximum	-0.001	0.120	0.119	0.130	-0.011
1.Nulldurchg.	0.035	0.232	0.267	0.262	0.005
2.Maximum	0.036	0.368	0.404	0.449	-0.045
2.Nulldurchg.	0.088	0.656	0.744	0.736	0.008
3.Maximum	0.085	0.725	0.810	0.811	-0.001
3.Nulldurchg.	0.069	0.835	0.904	0.902	0.002

1) Einheit: s
2) Differenzen: Mittelwerte der K-Gruppe minus Mittelwerte der anderen beiden Gruppen
3) Gruppe mit kürzeren interpolierten Zielbewegungen
4) Kontrollgruppe
5) Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen

Aus den in Tabelle 4 angegebenen Differenzen läßt sich ein charakteristisches Muster der Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit kürzeren interpolierten Zielbewegungen erkennen. Die Zeitintervalle zwischen einem Nulldurchgang (bzw. Bewegungsbeginn) und dem Zeitpunkt des nächsten Maximums sind jeweils etwa gleich groß, während die Zeitintervalle zwischen einem Maximum und dem nächsten Nulldurchgang in beiden Gruppen verschieden sind. Nach dem ersten und zweiten Maximum sind sie in der Gruppe mit kürzeren interpolierten Zielbewegungen kürzer, nach dem dritten aber länger.

Die Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen zeigen ein anderes Muster. Die Zeitintervalle zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen sind etwa gleich. Die beiden Teil-Intervalle zwischen Nulldurchgang und Maximum und Maximum und nächstem Nulldurchgang sind dagegen in beiden Gruppen verschieden lang: Der erste Abschnitt

dauert in der Gruppe mit interpolierten Zielbewegungen größerer Weite länger als in der Kontrollgruppe, der zweite ist dagegen kürzer. (Nach der ersten Beschleunigungs-Bremsphase, nach dem zweiten Nulldurchgang also, sind diese Unterschiede vernachlässigbar klein.)

Die Unterschiede in der mittleren Halbwertszeit zwischen den drei Gruppen entsprechen denen in den ausgewählten Zeitpunkten. Bei kürzeren interpolierten Zielbewegungen ist der Mittelwert mit 0.091 Sekunden kleiner als in der Kontrollgruppe mit 0.110 Sekunden, und in der Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen ist er geringfügig größer (0.115 Sekunden). Der Unterschied zwischen den drei Gruppen ist nicht signifikant, die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt jedoch unter 0.10 (H-Test).

Am Ende der Bewegung liegen praktisch keine Unterschiede zwischen den drei Gruppen mehr vor; insbesondere ist die Bewegungszeit bei kürzeren interpolierten Zielbewegungen nicht kleiner als in der Kontrollgruppe, sondern mit einem Mittelwert von 1.040 Sekunden gegenüber 0.989 Sekunden in der Kontrollgruppe eher länger. Die genaue Einstellung der Bewegung auf die Zielposition dürfte in der Gruppe mit interpolierten kürzeren Zielbewegungen demnach etwas länger dauern als in der Kontrollgruppe. In der Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen beträgt der Mittelwert der Bewegungszeit 1.056 Sekunden. Die Mittelwertsunterschiede zwischen den drei Gruppen sind nicht signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit unter 0.20; H-Test).

Tabelle 5: Gruppenmittelwerte der Maxima

Variable[1]	Grp.KiZ	K-Gruppe	Grp.wiZ
1.Maximum	1571	1149	1423
2.Maximum	1122	788	1094
3.Maximum	159	119	179

1) Einheit: $^{o}/s^{2}$

Die Mittelwerte der Variablen, die die Größe der Beschleunigungen in den drei Gruppen charakterisieren, sind, wie auch im ersten Versuch, trotz relativ großer Unterschiede nicht statistisch bedeutsam voneinander verschieden. Tabelle 5 zeigt, daß die Beschleunigungsmaxima in beiden Gruppen mit interpolierten Zielbewegungen anderer Weite größer sind als in der Kontrollgruppe. Entsprechend ist auch die mittlere Varianz in der Gruppe mit kürzeren interpolierten Bewegungen (1447 $(^{o}/s^{2})^{2}$) und in der mit weiteren (1480 $(^{o}/s^{2})^{2}$) größer als in der Kontrollgruppe (964 $(^{o}/s^{2})^{2}$). Sowohl bei den Maxima wie auch bei der Varianz liegen die Irrtumswahrscheinlichkeiten zwischen 0.10 und 0.20 (multivariate Verallgemeinerung des H-Test; H-Test).

Die mittlere Bewegungsstabilität ist in der Kontrollgruppe mit 0.884 kleiner als in der Gruppe mit interpolierten kürzeren Bewegungen (0.901) und der mit weiteren interpolierten Zielbewegungen (0.912). Auch dieser Mittelwertsunterschied ist statistisch nicht bedeutsam, aber die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt hier unter 0.10 (H-Test).

Tabelle 6: Gruppenmittelwerte der ausgewählten Zeitpunkte

Variable[1]	K-Gruppe	Grp.iS[2]	Differenz
1.Maximum	0.119	0.115	0.004
1.Nulldurchgang	0.267	0.275	-0.008
2.Maximum	0.404	0.421	-0.017
2.Nulldurchgang	0.744	0.746	-0.002
3.Maximum	0.810	0.832	-0.022
3.Nulldurchgang	0.904	0.936	-0.032

1) Einheit: s
2) Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen

Interpolierte Sinusbewegungen: Zur Prüfung des zweiten Teils der Hypothese selektiver Beeinflussung willkürlicher Bewegungen wurden die Mittelwerte der abhängigen Variablen

in der Kontrollgruppe und in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen miteinander verglichen. Tabelle 6 gibt die Mittelwerte der ausgewählten Zeitpunkte an, Tabelle 7 die der Beschleunigungsmaxima und Tabelle 8 die der übrigen Variablen.

Tabelle 7: Gruppenmittelwerte der Maxima

Variable[1]	K-Gruppe	Grp.iS
1.Maximum	1149	1248
2.Maximum	788	880
3.Maximum	119	142

1) Einheit: $^{o}/s^{2}$

Von den zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführten insgesamt sieben statistischen Tests (U-Tests; multivariate Verallgemeinerungen des H-Test) erbrachte nur einer ein auf dem 1%-Niveau signifikantes Ergebnis: Die Bewegungsstabilität ist in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen größer als in der Kontrollgruppe. Bei den Vergleichen der Mittelwerte aller anderen Variablen lagen die Irrtumswahrscheinlichkeiten stets über 0.20.

Tabelle 8: Gruppenmittelwerte der weiteren Variablen

Variable	K-Gruppe	Grp.iS
Fehlerintegral[1]	116	118
Halbwertszeit[2]	0.110	0.118
Bewegungszeit[2]	0.989	0.988
Varianz[3]	964	1372
Bewegungsstabilität	0.884	0.922

1) willkürliche Einheiten
2) Einheit: s
3) Einheit: $(^{o}/s^{2})^{2}$

Diskussion

Das Ergebnis dieses Versuchs entspricht der Hypothese selektiver Beeinflussung: Zielbewegungen beeinflussen den Verlauf von nachfolgenden Zielbewegungen anderer Weite, während Sinusbewegungen keine Auswirkungen auf den Verlauf nachfolgender Zielbewegungen zeigen. Unerwartet ist das Ergebnis jedoch hinsichtlich der Bewegungsstabilität; die Diskussion dieser Variablen soll zunächst zurückgestellt werden.

Bereits bei der Begründung der Hypothese selektiver Beeinflussung mit Hilfe des Bewegungsprogramm-Konzeptes wurde darauf hingewiesen, daß eine selektive Beeinflussung auch andere Ursachen haben kann als die, daß die motorischen Kommandos für bestimmte Bewegungen durch dieselbe nervöse Struktur bereitgestellt werden, für andere Bewegungen aber durch andere Strukturen. Solche alternativen Interpretationen des Ergebnisses dieses Versuchs müssen daher ausgeschlossen werden, damit es zur Unterstützung der Annahme von Bewegungsprogrammen herangezogen werden kann.

Innere Repräsentation des Bewegungs-Solls: Systematische Fehler in der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls für eine Zielbewegung könnten, wie bereits früher ausgeführt wurde, Einflüsse zwischen zwei Zielbewegungen mit unterschiedlichen Zielpositionen vermitteln, kaum aber Einflüsse einer Sinusbewegung auf den Verlauf einer Zielbewegung. Sie könnten demnach Grundlage der gefundenen selektiven Beeinflussung sein.

Es ist jedoch äußerst unwahrscheinlich, daß sie es tatsächlich sind. Zum einen zielte der Versuchsaufbau darauf ab, solche systematischen Fehler in der Lokalisation der Bewegungsziels bei Beginn der Bewegung zu verhindern. Zum anderen zeigen auch die Ergebnisse ein anderes Muster, als zu erwarten gewesen wäre, wenn das Ziel für die Standardbewegungen in systematischer Weise falsch lokalisiert

worden wäre.

Wenn das nämlich der Fall gewesen wäre, hätten die Standardbewegungen in der Gruppe mit interpolierten Zielbewegungen größerer Weite zunächst auf ein zu weit von der Startposition entfernt liegendes Ziel hinzielen sollen, in der Gruppe mit interpolierten Zielbewegungen geringerer Weite aber auf ein zu nahe gelegenes Ziel. Die Unterschiede zwischen diesen Gruppen und der Kontrollgruppe hätten dann den Unterschieden entsprechen sollen, wie sie zwischen Zielbewegungen größerer und kleinerer Weite zum Beispiel von T a y l o r & B i r m i n g h a m (1948) gefunden wurden. Insbesondere hätten die Beschleunigungsmaxima in der Gruppe mit interpolierten kürzeren Zielbewegungen am kleinsten sein sollen; tatsächlich waren sie jedoch am größten. Außerdem hätte der Zeitpunkt des ersten Nulldurchgangs in der Gruppe mit interpolierten Zielbewegungen größerer Weite später liegen sollen als in der Kontrollgruppe, was ebenfalls nicht der Fall gewesen ist. Demnach kommen systematische Fehler bei der Lokalisation des Bewegungsziels nicht für eine Interpretation des Ergebnisses dieses Versuchs in Frage.

Motorische Endstrecke: Die motorische Endstrecke ist in diesem Versuch für alle Bewegungen dieselbe gewesen, denn an allen Bewegungen waren dieselben Muskeln beteiligt. Eine selektive Beeinflussung durch die motorische Endstrecke könnte folglich allenfalls dadurch zustande kommen, daß die Muskeln oder nervöse Strukturen der Endstrecke durch verschiedene Bewegungen unterschiedlich stark ermüdet werden.

Im speziellen Fall müßte die Ermüdung durch eine Zielbewegung anderer Weite ein anderes Ausmaß gehabt haben als die Ermüdung durch eine Zielbewegung mit der Weite der Standardbewegung, während die Ermüdung durch die interpolierte Sinusbewegung der in der Kontrollgruppe entsprechen sollte. Eine solche Annahme erscheint angesichts

der Unterschiede zwischen Zielbewegungen unterschiedlicher Weite einerseits und Zielbewegungen und Sinusbewegungen andererseits ungerechtfertigt. Hinzukommt, daß Ermüdung in diesem Versuch kaum eine Rolle gespielt haben dürfte, denn die Pausen zwischen den einzelnen Bewegungen waren länger als die Bewegungen selbst.

Motivationale Faktoren: Motivationale Faktoren dürften im ersten Versuch zu den gefundenen Ergebnissen geführt haben, aber für die Ergebnisse dieses Versuchs sollten sie ohne Bedeutung sein. Es müßte nämlich postuliert werden, daß die Motivation für die Ausführung "möglichst schneller" Bewegungen in den beiden Gruppen mit interpolierten Zielbewegungen anderer Weite anders war als in der Kontrollgruppe, nicht aber in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen. Eine solche Annahme ist jedoch in meinen Augen unbegründet. Eher noch begründet wäre wohl die Annahme, daß sich die Vpn nach den Sinusbewegungen mit relativ kleinen maximalen Beschleunigungnen (bei 180 $^{o}/s^{2}$, wenn die Vp der Vorlage genau folgt) besonders stark oder auch besonders wenig bei den Zielbewegungen anstrengen.

Gegen die Wirkung motivationaler Faktoren spricht auch die Art der Einflüsse der Zielbewegungen anderer Weite auf den Verlauf der Standardbewegungen. Die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen mit interpolierten Zielbewegungen anderer Weite und der Kontrollgruppe sind nämlich relativ kompliziert und entsprechen nicht dem Ergebnismuster, daß bei generell größerem oder kleinerem Kraftaufwand zu erwarten wäre. Motivationale Faktoren sollten aber nur in relativ allgemeiner Weise den Kraftaufwand bei einer Bewegung beeinflussen können, so daß Unterschiede, die auf unterschiedliche Motivation zurückgehen, derart sein sollten, daß alle ausgewählten Zeitpunkte in relativ gleichförmiger Weise früher oder später liegen und die Beschleunigungsmaxima entsprechend größer

oder kleiner sind. Da ein solches Ergebnismuster nicht vorliegt, können auch motivationale Faktoren als Grundlage der gefundenen selektiven Beeinflussung ausgeschlossen werden.

Spezielle Aspekte der Versuchsanordnung: Eine weitere Möglichkeit für das Zustandekommen der gefundenen selektiven Beeinflussung könnte darin gesehen werden, daß die Längen der Pausen zwischen den einzelnen Bewegungen nicht in allen vier Versuchsgruppen gleich waren. Insbesondere war die Pause vor der interpolierten Sinusbewegung (unter Einschluß der Vorperiode und der Voranzeige) einige Sekunden länger als alle anderen Pausen (maximal 6.5 Sekunden gegenüber sonst maximal 2.5 Sekunden).

Wie die Ergebnisse mit den bei der Diskussion des ersten Versuchs beschriebenen zusätzlichen Gruppen zeigen, haben die Pausenzeiten jedoch keine Auswirkungen auf die Bewegungsverläufe. Wenn sie Auswirkungen hätten, wären in diesem Versuch auch eher Unterschiede zwischen der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen und der Kontrollgruppe zu erwarten gewesen, denn die Unterschiede in den Pausenzeiten sind zwischen diesen beiden Gruppen größer als zwischen der Kontrollgruppe und den beiden Gruppen mit interpolierten Zielbewegungen anderer Weite.

Zeitintervalle zwischen den Bewegungen können deren Verläufe jedoch nicht nur im Sinne einer Hauptwirkung beeinflussen, sondern auch im Sinne einer Wechselwirkung: Der Einfluß einer Bewegung auf den Verlauf einer nachfolgenden anderen Bewegung kann davon abhängen, wie lang die Pause zwischen beiden Bewegungen ist. In diesem Versuch sollte eine solche Wirkung in erster Linie vom Zeitintervall vor der Standardbewegung ausgehen. Das war jedoch in allen Gruppen nahezu gleich: Nach den interpolierten Bewegungen folgte stets eine Rückbewegung nach links mit der Weite der Standardbewegung und dann die Standardbewegung. Da in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewe-

gungen die Pausen vor den Zielbewegungen jeweils um 0.4 Sekunden kürzer waren als in den anderen drei Gruppen, hätte, sofern dieses Zeitintervall hier von Bedeutung gewesen sein sollte, sich eher ein Einfluß der interpolierten Sinusbewegungen auf den Verlauf der Standardbewegungen zeigen sollen.

Für die Vermutung, daß das in den vier Gruppen unterschiedlich lange Zeitintervall nach der Standardbewegung und vor den interpolierten Bewegungen für den Einfluß der interpolierten Bewegungen auf den Verlauf der Standardbewegungen von Bedeutung sein sollte, gibt es keinen Grund.

Unmittelbar diese Frage betreffende experimentelle Ergebnisse liegen nicht vor. In Untersuchungen zum motorischen Kurzzeitgedächtnis aber zeigt sich, daß die Wirkung einer interpolierten Zielbewegung anderer Weite zwar vom Zeitintervall zwischen interpolierter Bewegung und Reproduktion abhängt, aber nicht von der Zeit zwischen Vorgabe und interpolierter Bewegungen.

S t e l m a c h & W a l s h (1973) variierten die beiden Zeitintervalle vor und nach der interpolierten Bewegung unabhängig voneinander; wenn eins der beiden Zeitintervalle gleich bleibt und nur das andere variiert wird, ändert sich auch die Gesamtdauer des Behaltensintervalls. Obwohl die Ergebnisse dieses Versuchs nicht in Bezug auf die hier behandelte Frage ausgewertet wurden, läßt sich aus den Abbildungen doch folgendes erkennen: Wenn das Zeitintervall zwischen Vorgabe und interpolierter Bewegung gleich bleibt (5 bzw. 30 Sekunden) und das Zeitintervall zwischen interpolierter Bewegung und Reproduktion größer wird (10, 35 und 60 bzw. 10 und 35 Sekunden), so wird das Bias kleiner. Wenn dagegen das Zeitintervall zwischen interpolierter Bewegung und Reproduktion gleich bleibt (10 bzw. 35 Sekunden), das Intervall zwischen Vorgabe und interpolierter Bewegung aber größer wird (5,30 und 55 bzw. 5 und 30 Sekunden), so bleibt das Bias nahezu gleich. (Das trifft nur für interpolierte Bewegungen größerer Weite zu, denn bei Bewegungen kleinerer Weite fanden S t e l m a c h & W a l s h kein Bias).

Auch in einem sehr ähnlichen experimentellen Paradigma, allerdings mit anderem Material, finden sich Hinweise darauf, daß die Pause zwischen Vorgabe und interpolierter Bewegung für das Ausmaß der Beeinflussung keine oder allenfalls geringe Bedeutung besitzt: In Versuchen zur retroaktiven Hemmung beim verbalen Lernen hängt das Ausmaß der Hemmung zwar vom Zeitintervall zwi-

schen dem Lernen des interpolierten Materials und der Reproduktion des Original-Materials ab, aber nicht vom Intervall zwischen dem Lernen des Original- und des interpolierten Materials (F o p p a, 1965, S. 280-282).

Eine zweite Möglichkeit, das Ergebnis auf spezielle Aspekte der Versuchsanordnung zurückzuführen, kann davon ausgehen, daß die interpolierten Zielbewegungen eine andere Bewegungsweite hatten als die Standardbewegungen, die interpolierte Sinusbewegung aber dieselbe Weite. Eine definitive Antwort auf die Frage, ob Unterschiede in der Bewegungsweite für das Auftreten einer Beeinflussung kritisch sind, kann nur ein weiterer Versuch geben. Warum sollte aber gerade die Bewegungsweite ein derart kritisches Merkmal sein? Der Verlauf einer Sinusbewegung ist auch bei gleicher Weite anders als der Verlauf einer Zielbewegung. Ein zusätzlicher Unterschied in der Weite würde den Unterschied zwischen den Beschleunigungsverläufen bei beiden Bewegungen nur noch geringfügig verändern; speziell würde der Unterschied in der Größe der Beschleunigungsmaxima etwas größer oder kleiner sein.

Die Weite einer Sinusbewegung könnte offenbar nur dann von kritischer Bedeutung sein, wenn sie die Lokalisation des Ziels einer nachfolgenden Zielbewegung beeinflussen würde. Abgesehen davon, daß das nicht notwendig der Fall ist, scheinen in diesem Versuch systematische Fehler bei der Lokalisation des Bewegungsziels auch dann nicht aufgetreten zu sein, wenn Zielbewegungen unterschiedlicher Weite verwendet wurden. Aus diesem Grunde, und weil die Weite einer Sinusbewegung für den Unterschied zwischen den motorischen Kommandos bei Zielbewegungen und Sinusbewegungen nur eine untergeordnete Rolle spielt, dürfte auch dieser spezielle Aspekt der Versuchsanordnung für die gefundene selektive Beeinflussung keine Rolle gespielt haben.

Ein weiterer Versuch einer alternativen Interpretation der selektiven Beeinflussung schließlich kann von

der speziellen Definition des Bewegungsbeginns ausgehen. Eine Bewegung galt nämlich erst dann als begonnen, wenn die Beschleunigung größer als 57.25 Grad/Sekunde-Quadrat war. Dieser Wert wird früher überschritten, wenn die Maxima der Beschleunigung größer sind, denn dann erfolgt in der Regel auch der Anstieg der Beschleunigung schneller (vgl. S e a r l e & T a y l o r, 1948). Da der so definierte Beginn der Bewegung den Nullpunkt für die Werte der ausgewählten Zeitpunkte darstellt, sollten diese größer sein, wenn die Beschleunigungen größer sind. Dieser Zusammenhang von ausgewählten Zeitpunkten und Größe der Beschleunigungsmaxima ist also genau umgekehrt wie der, der durch die geforderte Bewegungsweite vermittelt wird.

Für die Ergebnisse dieses Versuchs kann die Definition des Bewegungsbeginns aus verschiedenen Gründen jedoch keine Rolle gespielt haben. So sind beispielsweise in der Gruppe mit interpolierten kürzeren Zielbewegungen die Maxima am größten, aber die ausgewählten Zeitpunkte liegen, bis auf den ersten, dennoch früher als in der Kontrollgruppe. Der durch die Definition des Bewegungsbeginns gestiftete artifizielle Zusammenhang spielt offenbar im Vergleich zu dem Zusammenhang in umgekehrter Richtung, der durch die vorgegebene Bewegungsweite vermittelt wird, keine Rolle.

Nach den bisherigen Überlegungen ist es gerechtfertigt, die gefundene selektive Beeinflussung im Hinblick auf gleiche bzw. verschiedene nervöse Strukturen, die die motorischen Kommandos für die Bewegungen bereitstellen, zu interpretieren, und sie somit als eine Unterstützung des Bewegungsprogramm-Konzeptes aufzufassen. Im folgenden soll gezeigt werden, daß auch das zunächst unerwartete Ergebnis zur Bewegungsstabilität im Einklang mit dieser Interpretation steht.

Bewegungsstabilität: Die Bewegungsstabilität ist in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen größer als in der Kontrollgruppe. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses kann zunächst gefragt werden, warum die Stabilität in der Kontrollgruppe so klein ist; andererseits kann die Frage aber auch andersherum formuliert werden, warum nämlich die Stabilität bei interpolierten Sinusbewegungen so groß ist. Ausgangspunkt für beide Überlegungen ist das Postulat, daß in der Kontrollgruppe jede

Bewegung durch dasselbe Bewegungsprogramm gesteuert wird, während den interpolierten Sinusbewegungen ein anderes Programm zugrundeliegt.

Sofern diese Annahme zutrifft, ist in der Kontrollgruppe das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aktivierungen der nervösen Struktur, deren Funktion der eines Bewegungsprogramms entspricht, kleiner als in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen. Es könnte daher in stärkerem Ausmaß reaktive Hemmung oder Ermüdung auftreten, und das wiederum könnte zu größerer Variabilität der Bewegungsverläufe führen.

Wie bereits erwähnt wurde, dürft Ermüdung in diesem Versuch jedoch keine Rolle gespielt haben. Gegen die beschriebene Interpretation spricht aber auch das Ergebnis mit einer weiteren Gruppe von 12 männlichen Vpn, bei der zwischen den Standardbewegungen und den jeweils folgenden Rückbewegungen keine interpolierten Bewegungen lagen, sondern Pausen.(Jeder Durchgang bestand also aus der Sequenz Standardbewegung, lange Pause, Rückbewegung.) Da reaktive Hemmung bzw. Ermüdung spontan schwindet, sollte auch in dieser Gruppe die Bewegungsstabilität erhöht sein. Das ist jedoch nicht der Fall, sondern mit O.874 ist sie eher kleiner als in der Kontrollgruppe (O.884); Der Unterschied ist allerdings nicht signifikant (U-Test).

Die Ergebnisse mit dieser Gruppe sprechen auch gegen die Möglichkeit, die Unterschiede in der Bewegungsstabilität als Artefakt aufzufassen. Korrelationen sind in der Regel nämlich größer, wenn die Varianzen größer sind. Da nun die Varianzen in der Kontrollgruppe am kleinsten sind und die Bewegungsstabilität ebenfalls, könnten die Unterschiede in der Bewegungsstabilität auf die Unterschiede in den Varianzen zurückgehen. In der zusätzlichen Gruppe ist jedoch die Bewegungsstabilität kleiner als in allen vier Versuchsgruppen, obwohl die Varianz mit 2791 $(o/s2)^2$ wesentlich größer ist.

Eine Interpretation der Ergebnisse zur Bewegungsstabilität mit Hilfe reaktiver Hemmung oder Ermüdung ist

offensichtlich unzutreffend. Daher soll im folgenden eine Interpretation erläutert werden, die von der umgekehrten Frage ausgeht, warum nämlich die Bewegungsstabilität bei interpolierten Sinusbewegungen so groß ist.

Nach der Begründung der Hypothese selektiver Beeinflussung mit Hilfe des Bewegungsprogramm-Konzeptes sollte die allen untersuchten Bewegungen gemeinsame motorische Endstrecke in der Kontrollgruppe stets durch dieselbe nervöse Struktur aktiviert worden sein, in der Gruppe mit interpolierten Sinusbewegungen aber jeweils alternierend durch zwei verschiedene Strukturen. Im zweiten Fall ist nun die Bewegungsstabilität größer. Der Unterschied in der Bewegungsstabilität kann mit dem Unterschied in der Ansteuerung der motorischen Endstrecke in Verbindung gebracht werden; diese Beziehung hat allerdings recht spekulativen Charakter. Im Einzelnen erfordert sie zwei Annahmen:

1) Es ist zu postulieren, daß die Aktivität der motorischen Endstrecke bei Aktivierung durch die nervöse Struktur, die die motorischen Kommandos für Zielbewegungen bereitstellt, unterschiedlich ist je nachdem, ob sie ausschließlich durch diese Struktur angesteuert wird oder aber alternierend durch diese und eine andere, nämlich diejenige, die die motorischen Kommandos für Sinusbewegungen erstellt.

2) Als zweites ist anzunehmen, daß der Unterschied in der Aktivität der motorischen Endstrecke unter beiden Bedingungen der Ansteuerung sich nur in der Bewegungsstabilität auswirkt, nicht aber in den anderen Verlaufseigenschaften der Bewegung.

Für beide Annahmen findet sich eine gewisse Unterstützung in Ergebnissen physiologischer Untersuchungen, die von B u r n s (1968) berichtet werden.

Zu 1: B u r n s (1968, S. 157-161) berichtet von Experimenten folgender Art: In einem isolierten Kortex-

Präparat ohne Spontanaktivität wurde die Aktivität einer einzelnen Zelle Z abgeleitet, und zwar nach einem Testreiz über eine subkortikale Elektrode Y in der weißen Masse des Präparats. Dem Testreiz gingen "Lernphasen" voraus, in denen die Zelle Z entweder durch die subkortikale Elektrode Y oder durch eine zweite Elektrode X auf der Kortex-Oberfläche aktiviert wurde. Nach einer Lernphase mit der Oberflächen-Elektrode X zeigte nun die Zelle Z beim Testreiz über die subkortikale Elektrode Y eine stärkere Aktivität als nach einer Lernphase mit der Elektrode Y, über die auch der Testreiz gesetzt wurde.

Dieses Ergebnis kann, mit entprechenden Vorbehalten, auf die hier behandelte Frage verallgemeinert werden: Die Entladungsfrequenz von Nervenzellen der motorischen Endstrecke (Z) sollte bei Erregung durch eine nervöse Struktur (Y) dann größer sein, wenn sie vorher durch eine andere Struktur (X) erregt wurde, als wenn die Aktivierung durch dieselbe Struktur (Y) erfolgte. (Bei den Nervenzellen der motorischen Endstrecke könnte es sich zum Beispiel um Neurone handeln, die funktionell oberhalb der Pyramidenzellen der primären motorischen Hirnrinde liegen.)

Zu 2: Ein Zusammenhang zwischen der Entladungsfrequenz höherer Neurone der motorischen Endstrecke und der Bewegungsstabilität scheint naheliegend: Je höher die Entladungsfrequenz ist, desto geringer sollte die relative Bedeutung zufälliger Prozesse im Nervensystem sein. Technisch ausgedrückt ist das Signal-Rauschen-Verhältnis bei höheren Entladungsfrequenzen größer.

Weniger naheliegend scheint mir die Annahme zu sein, daß durch die höheren Entladungsfrequenzen nur die Stabilität der Bewegungen beeinflußt werden soll, nicht aber ihr mittlerer Verlauf. Nach B u r n s (1968, S. 82) ist jedoch die mittlere Entladungsfrequenz ein relativ unbedeutendes Merkmal kortikaler Nervenzellen; die Information soll vielmehr in anderen Merkmalen des räumlichen und zeitlichen Aktivitätsmusters kodiert sein. Folglich scheint es möglich, daß der Verlauf der Bewegung mit der mittleren Entladungsfrequenz kortikaler Zellen der motorischen Endstrecke nichts zu tun hat.

Aus dieser Interpretation ergeben sich experimentell prüfbare Folgerungen. So sollte beispielsweise die Bewegungsstabilität nicht erhöht sein, wenn die motorische Endstrecke bei den interpolierten Sinusbewegungen und den Zielbewegungen nicht identisch ist. Sofern diese Interpretation zutrifft - ihre experimentell prüfbaren Implikationen wurden allerdings nicht weiter untersucht - kann auch die Bewegungsstabilität als Kriterium für die Äquivalenz von Bewegungen betrachtet werden: Bei der Kombination nicht äquivalenter Bewegungen sollte sie größer sein als in dem Fall, in dem äquivalente Bewegungen alternierend auszuführen sind. (Vorausgesetzt werden dabei

identische motorische Endstrecken.)

Bewegungsprogramme und nervöse Hierarchie: Nach der bisherigen Diskussion kann die Annahme von Bewegungsprogrammen als unterstützt gelten, weil die Ergebnisse dieses Versuchs darauf hinweisen, daß die motorischen Kommandos für bestimmte unterschiedliche Bewegungen durch dieselbe nervöse Struktur bereitgestellt werden, für andere unterschiedliche Bewegungen aber durch verschiedene Strukturen. Diese Beziehung zwischen dem abstrakten, an der Analogie zum Computer orientierten, Konzept des Bewegungsprogramms und einer bestimmten nervösen Struktur im tatsächlichen organischen Geschehen reichte aus, um die Hypothese selektiver Beeinflussung zu begründen und die Ergebnisse dieses Versuchs zu interpretieren. Dabei wurde stillschweigend davon ausgegangen, daß die Programm-Parameter unterschiedlicher Aktivität in den nervösen Strukturen zuzuordnen sind, wie es der Computer-Analogie entspricht: unterschiedliche Parameter entsprechen ja unterschiedlichen Werten in gleichen Speicher-Elementen. Im folgenden soll die Frage des Zusammenhangs zwischen den abstrakten Konzepten des Bewegungsprogramms und der Programm-Parameter und dem tatsächlichen nervösen Geschehen etwas näher behandelt werden.

In den Ergebnissen dieses Versuchs finden sich Hinweise darauf, daß eine Zuordnung verschiedener Programm-Parameter zu unterschiedlicher nervöser Aktivität in gleichen Strukturen unzutreffend ist. Einige Aspekte der Ergebnisse, die allerdings nicht statistisch abgesichert sind, legen vielmehr die Auffassung nahe, daß auch verschiedene Programm-Parameter unterschiedlichen, aber einander überlappenden, Strukturen zuzuordnen sind. Der erste Hinweis darauf findet sich, wenn die Einflüsse der kürzeren und weiteren Zielbewegungen auf den Verlauf der Standardbewegungen näher betrachtet werden.

Obwohl die Fragestellung dieses Versuchs nicht die spezielle Form der Einflüsse zwischen Zielbewegungen

unterschiedlicher Weite betrifft, möchte ich an dieser Stelle kurz darauf eingehen.

Betrachtet man nur die Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit kürzeren interpolierten Zielbewegungen, so zeigt sich ein Einfluß der interpolierten Bewegungen vor allem in den Zeitpunkten der Maxima und Nulldurchgänge: sie sind bei den Standardbewegungen an die bei den interpolierten kürzeren Bewegungen angenähert. Die Beschleunigungsmaxima dagegen sind größer als in der Kontrollgruppe, so daß die Standardbewegungen trotz der früher liegenden ausgewählten Zeitpunkte die geforderte Weite bekommen.

Dieses Ergebnis legt die Unterscheidung von zwei Gruppen von Parametern eines Bewegungsprogramms nahe, nämlich einerseits von "zeitbestimmenden Parametern", die nur relativ schlecht von einer Bewegung zur nächsten verändert werden können, und andererseits von "amplitudenbestimmenden Parametern", die leicht modifizierbar sind. Eine solche Unterscheidung ist einer Unterscheidung von v o n H o l s t (1939) sehr ähnlich, der unterschiedliche nervöse Elemente für die Kontrolle der Frequenz und der Amplitude des Flossenschlags von Fischen annimmt. Auch die weitergehende Aussage, daß zeitbestimmende Programm-Parameter schwerer modifizierbar sind als amplitudenbestimmende, findet eine Entsprechung bei v o n H o l s t (1939). Mit Hilfe einer solchen Annahme interpretiert er nämlich die "Regel der konstanten Figurzeit", nach der das Nachfahren gleicher Figuren unterschiedlicher Größe mit dem Finger nahezu gleichbleibende Zeit erfordert (K e r n, 1933; D e r w o r t, 1938).

Eine solche Interpretation erweist sich jedoch als unzutreffend, wenn man die Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen betrachtet. Wenn diese Interpretation nämlich zutreffen würde, hätten die ausgewählten Zeitpunkte der Standardbewegungen im Fall interpolierter weiterer Zielbewegungen später liegen müssen; das ist jedoch nur bei den Zeitpunkten der Beschleunigungsmaxima der Fall. Außerdem hätten die Beschleunigungsmaxima kleiner sein müssen, was ebenfalls nicht zutrifft.

Die wechselseitige Beeinflussung von Zielbewegungen unterschiedlicher Weite folgt offenbar komplizierteren Regeln als den genannten; die Aufklärung dieser Regeln erfordert spezielle Versuchspläne.

Für die hier behandelte Frage ist wesentlich, daß die Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit weiteren interpolierten Zielbewegungen bei fast allen Variablen kleiner sind als die zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit kürzeren interpolierten

Zielbewegungen. Das könnte so interpretiert werden, daß die an der Ausführung der Standardbewegungen beteiligten nervösen Strukturen zu einem größeren Anteil auch an der Ausführung kürzerer Zielbewegungen beteiligt sind als an der Ausführung weiterer. Diese Interpretation beruht auf der Annahme, daß das Ausmaß der Beeinflussung einer Bewegung durch eine vorhergehende andere Bewegung davon abhängt, zu welchem Anteil die nervösen Strukturen, die die motorischen Kommandos für die beeinflußte Bewegung bereitstellen, auch an der Bereitstellung der motorischen Kommandos für die vorhergehende Bewegung beteiligt sind.

In die gleiche Richtung zielt der zweite Hinweis in den Ergebnissen. Wenn man der Interpretation der Ergebnisse zur Bewegungsstabilität folgt, sollte diese umso größer sein, je geringer die gemeinsamen strukturellen Anteile der Standardbewegungen und der interpolierten Bewegungen sind. Desto größer nämlich sollten die Anteile sein, die für jede Bewegung spezifisch sind und die die gemeinsame motorische Endstrecke alternierend aktivieren, was ja die Stabilität der Bewegungen fördern soll. Die Rangordnung der Versuchsbedingungen nach der Bewegungsstabilität muß nach dieser Überlegung also umgekehrt sein wie die Rangordnung nach dem Ausmaß der Beeinflussung. Betrachtet man nun die drei Gruppen mit interpolierten anderen Bewegungen, so zeigt sich, daß das der Fall ist: Die Bewegungsstabilität ist am größten, wenn das Ausmaß der Beeinflussung am kleinsten ist (interpolierte Sinusbewegungen), und wenn das Ausmaß der Beeinflussung am größten ist, ist die Bewegungsstabilität am kleinsten (interpolierte Zielbewegungen kleinerer Weite).

Folgt man diesen Hinweisen, so gelangt man zu einer - allerdings in hohem Maße hypothetischen - Auffassung über die an der Bereitstellung motorischer Kommandos beteiligten nervösen Strukturen, wie sie in Abbildung 7 skizziert ist: Der inneren Repräsentation des Bewegungs-Solls werden bestimmte Bewegungsprogramme zugeordnet, d.h.,

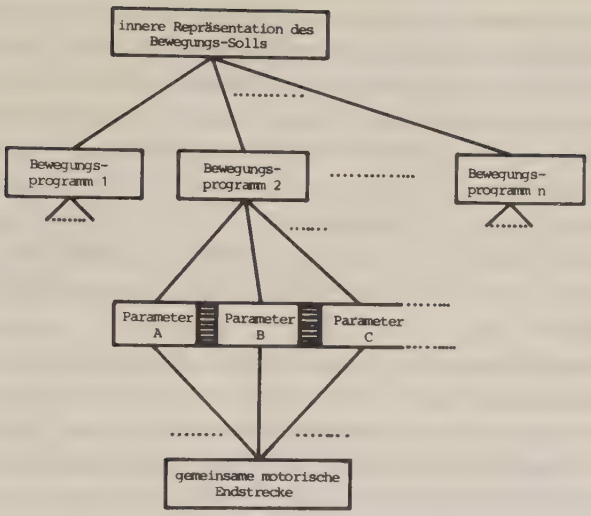


Abbildung 7: Strukturen bei der Programm-Steuerung

es werden nervöse Strukturen aktiviert, die für bestimmte Bewegungsformen spezifisch sind und einander nicht überlappen. Von diesen Strukturen aus werden funktionell untergeordnete Strukturen aktiviert, die Überlappungen aufweisen. Durch diese Strukturen werden die Einzelheiten des Bewegungsverlaufs festgelegt; sie entsprechen demnach den Programm-Parametern.

Eine versus viele Hierarchien: Die in Abbildung 7 skizzierte Auffassung hat zwar einen äußerst hypothetischen Charakter, sofern man nur ihre Begründung durch die Hinweise in den Ergebnissen dieses Experiments sieht; sie wird aber etwas glaubwürdiger, wenn man berücksichtigt, daß sie einen speziellen Fall einer allgemeineren hierarchischen Auffassung darstellt, wie sie zum Beispiel von R o s e n b a u m (1977) vertreten wird.

Nach dieser Auffassung werden Bewegungen durch eine nervöse Hierarchie gesteuert, die, grob gesprochen, der Hierarchie im visuellen System entspricht, nur daß sie in entgegengesetzter Richtung durchlaufen wird. Auf der obersten Ebene der Hierarchie wird etwa die Grundform der Bewegung festgelegt; hier liegen komplexe Zellen, die, analog den komplexen Zellen des visuellen Systems, bei bestimmten Klassen von Bewegungen aktiv sind. Von dieser obersten Ebene läuft die Erregung auf divergierenden und konvergierenden Wegen die Hierarchie abwärts; durch den speziellen Weg werden die Einzelheiten des Bewegungsverlaufs festgelegt.

Die in Abbildung 7 skizzierte Vorstellung über die nervösen Strukturen, die an der Bereitstellung der motorischen Kommandos für eine Bewegung beteiligt sind, ist insofern ein spezieller Fall der allgemeineren hierarchischen Auffassung, als bei ihr postuliert wird, daß die von verschiedenen Zellen oder Zellverbänden in der obersten Ebene der Hierarchie ausgehenden abwärts verlaufenden Wege einander nicht überlappen. Es werden also statt einer einheitlichen Hierarchie im Grunde viele Hierarchien angenommen. Jede Hierarchie bzw. die oberste Ebene jeder Hierarchie entspricht einem Bewegungsprogramm, und die durch jede Hierarchie abwärts verlaufenden Wege, durch deren speziellen Verlauf die Einzelheiten der Bewegungen festgelegt werden, entsprechen den Programm-Parametern.

Die Annahmen einer einheitlichen und vieler verschiedener Hierarchien führen zu unterschiedlichen Erwartungen hinsichtlich der wechselseitigen Beeinflussung willkürlicher Bewegungen: Nach der Auffassung einer einzigen Hierarchie sind graduelle Abstufungen im Ausmaß der Beeinflussung zu erwarten, da sich die nervösen Strukturen, die die motorischen Kommandos für die Bewegung bereitstellen, in einem kontinuierlich variierenden Ausmaß überlappen können. Nach der speziellen Auffassung vieler Hierarchien dagegen sollten solche graduellen Abstufungen

nur zwischen unterschiedlichen Bewegungen auftreten, die einer bestimmten Gruppe angehören, nicht aber zwischen Bewegungen, die zu verschiedenen Gruppen gehören. Die Gruppenzugehörigkeit jeder Bewegung wird dabei dadurch bestimmt, welche anderen Bewegungen sie beeinflußt. Theoretisch ist sie durch die Zuordnung zu Bewegungsprogrammen bzw. zu einzelnen Hierarchien definiert.

An dieser Stelle wird deutlich, daß die Ergebnisse dieses Versuchs nicht nur mit der speziellen hierarchischen Auffassung in Einklang stehen, sondern auch mit der allgemeinen. Auch im zweiten Fall einer einzigen Hierarchie ist es nämlich möglich, daß die nervösen Strukturen, die die motorischen Kommandos für zwei verschiedene Bewegungen bereitstellen, einander nicht überlappen, so daß auch nach dieser Auffassung ein Einfluß einer Sinusbewegung auf den Verlauf einer nachfolgenden Zielbewegung fehlen darf. (Allerdings kann das Fehlen einer Beeinflussung nach der allgemeinen Auffassung kaum a priori erwartet werden.)

Es scheint prinzipiell nicht möglich, daß ein Ergebnis, das der speziellen Auffassung entspricht, nur nach dieser Auffassung interpretiert werden kann und nicht auch nach der allgemeineren. Es ist nur möglich, die spezielle Auffassung vieler getrennter Hierarchien zu widerlegen, etwa indem gezeigt wird, daß eine Bewegung A den Verlauf einer Bewegung B beeinflußt sowie den Verlauf einer Bewegung C, während B und C einander nicht beeinflussen. Die Bewegungen A und B würden in diesem Fall demselben Bewegungsprogramm zugeordnet, während hinsichtlich der Bewegung C einerseits ein anderes, andererseits aber dasselbe Bewegungsprogramm angenommen werden müßte. (Von statistischen Problemen beim Nachweis solcher Inkonsistenzen sei hier abgesehen.) Die Annahme vieler Hierarchien kann folglich nur dadurch glaubwürdiger gemacht werden, indem sich in einer Reihe von Versuchen eine konsistente Zuordnung verschiedener Bewegungen zu verschiedenen Bewegungsprogrammen als möglich erweist.

Obwohl die Ergebnisse hinsichtlich der Frage eine versus viele Hierarchien nicht eindeutig interpretierbar sind -wie erwähnt, ist das bei allen Ergebnissen der Fall, die der Annahme vieler Hierarchien entsprechen

- gibt es m.E. zumindest zwei Gründe für ein vorläufiges Akzeptieren der speziellen Hypothese mehrerer oder vieler Hierarchien:

1) Die Auffassung vieler Hierarchien entspricht dem Konzept des Bewegungsprogramms, und zwar der Variante des Konzepts, die annimmt, daß jeweils Gruppen von Bewegungen durch dasselbe Programm gesteuert werden. Die beiden Konzepte, das eine eher am tatsächlichen nervösen Geschehen orientiert, das andere davon abstrahierend, stehen im Einklang miteinander, und aus beiden Konzepten sind die Ergebnisse dieses Versuches unabhängig voneinander herleitbar.

2) Die Auffassung vieler Hierarchien erlaubt strengere Vorhersagen als die einer einheitlichen Hierarchie. Nach den Ergebnissen dieses Versuchs wäre zum Beispiel zu erwarten, daß auch solche Zielbewegungen einander beeinflussen, die sich in anderer Hinsicht voneinander unterscheiden als die hier untersuchten, während der Verlauf von Zielbewegungen durch Sinusbewegungen auch mit anderen Frequenzen und Amplituden nicht beeinflußt werden sollte. Nach der Auffassung einer einheitlichen Hierarchie dagegen ist eine Vorhersage über das Auftreten oder Fehlen bzw. über das Ausmaß einer Beeinflussung nicht möglich.

Zusammenfassung

Bewegungsprogramme sind in Abgrenzung gegen Regelvorgänge durch zwei Merkmale definiert: Sie sollen keine peripheren Rückmeldungen erfordern und die motorischen Kommandos bereits vor Beginn einer Bewegung bereitstellen. Während es als relativ gesichert betrachtet werden kann, daß willkürliche Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen möglich sind, konnte bisher nicht gezeigt werden, daß die motorischen Kommandos bereits vor Bewegungsbeginn bereitgestellt werden. Da zum einen die Möglichkeit, willkürliche Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen auszuführen, als Begründung für die Annahme von Bewegungsprogrammen nicht ausreicht, und da zum anderen die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn unter Umständen gar nicht nachweisbar ist, wurde auf ein anderes Kriterium zur Begründung des Bewegungsprogramm-Konzeptes zurückgegriffen.

Nur unter Annahme von Bewegungsprogrammen sollten sich Klassen äquivalenter Bewegungen finden lassen, die durch dasselbe Programm gesteuert werden. Als Kriterien für die Äquivalenz von Bewegungen wurden bisher Reaktionszeiten und selektive Ermüdung verwendet. In dieser Untersuchung diente die Beeinflussung des Verlaufs einer Bewegung durch eine vorhergehende andere Bewegung als Kriterium: Nur zwischen äquivalenten Bewegungen (gleiches Bewegungsprogramm) sollte ein solcher Einfluß auftreten, nicht aber ziwschen nicht äquivalenten Bewegungen (verschiedene Bewegungsprogramme).

Diese Hypothese selektiver Beeinflussung willkürlicher Bewegungen wurde in zwei Versuchen mit Hilfe einer Tracking-Anordnung geprüft. Im ersten Versuch wurde der Einfluß einer langsameren Zielbewegung auf den Verlauf einer schnelleren Zielbewegung gleicher Weite untersucht. Die Ergebnisse konnten jedoch nicht auf die Hypothese bezogen werden, sondern gehen wahrscheinlich auf motiva-

tionale Faktoren zurück: Wenn Zielbewegungen, die "möglichst schnell und genau" auszuführen sind, mit Zielbewegungen alternieren, die ein "bequemes Tempo" haben sollen, werden sie mit größerem Kraftaufwand ausgeführt als in der Kontrollbedingung.

Im zweiten Versuch wurde der Einfluß von Zielbewegungen größerer und kleinerer Weite einerseits und der von Bewegungen mit einem sinusförmigen Zeitverlauf andererseits auf den Verlauf einer Zielbewegung untersucht. Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese selektiver Beeinflussung: Der Verlauf der Zielbewegungen wird durch interpolierte Zielbewegungen anderer Weite beeinflußt, aber nicht durch interpolierte Sinusbewegungen. Interpolierte Sinusbewegungen führen nur zu geringerer Variabilität der Zielbewegungsverläufe.

Literatur

Adams, J.A.: A closed-loop theory of motor learning
Journal of Motor Behavior, 1971, 3, 111-150

Adams, J.A.: Issues for a closed-loop theory of motor learning
In: Stelmach, G.E. (Hrsg.), 1976

Amelang, M.: Untersuchungen über die Unterbrechung einfacher motorischer Handlungen
Dissertation, Marburg 1966

Angel, R.W., Garland, H. & Fischler, M.: Tracking errors amended without visual feedback
Journal of Experimental Psychology, 1971, 89, 422-424

Ascoli, K.M. & Schmidt, R.A.: Proactive interference in short-term motor retention
Journal of Motor Behavior, 1969, 1, 29-36

Beggs, W.D.A., Andrew, J.A., Baker, M.L., Dove, S.R., Fairclough, I. & Howarth, C.I.: The accuracy of non-visual aiming
Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1972, 24, 515-523

Beggs, W.D.A. & Howarth, C.I.: The accuracy of aiming at a target: Some further evidence for a theory of intermittent control
Acta Psychologica, 1972, 36, 171-177

Berman, A.J. & Berman, D.: Fetal deafferentation: The ontogenesis of movement in the absence of peripheral sensory feedback
Experimental Neurology, 1973, 38, 170-176

B e r m a n, A.J. & T a u b, E.: Purposive movement in a deafferented limb
Transactions of the American Neurological Association, 1966, 91, 193-195

B e r m a n, A.J., T a u b, E., P o m i n a, A.C. & K n a p p, H.D.: Further observations on deafferentation in the monkey
Transactions of the American Neurological Association, 1968, 129, 198-199

B e r m a n, A.J., T e o d o r y, D. & U y g u r, Z.: Induced use of a unilaterally deafferented limb
Experimental Neurology, 1971, 32, 176-183

B i l o d e a u, E.A. (Hrsg.): Acquisition of Skill
New York: Academic Press 1966

B r o w n, H.S. & S l a t e r - H a m m e l, A.T.: Discrete movements in the horizontal plane as a function of their length and direction
Journal of Experimental Psychology, 1949, 39, 84-95

B r o w n, K., L e e, J. & R i n g, P.A.: The sensation of passive movement at the metatarso-phalangeal joint of the great toe in man
Journal of Physiology, 1964, 126, 317-335

B u r n s, D.: The Uncertain Nervous System
London: Arnold 1968

C h a s e, R.A.: An information-flow model of the organization of motor activity. I: Transduction, transmission, and central control of sensory information
Journal of Nervous and Mental Disease, 1965a, 140, 239-251

C h a s e, R.A.: An information-flow model of the organization of motor activity. II: Sampling, central processing, and utilization of sensory information
Journal of Nervous and Mental Disease, 1965b, 140, 334-350

C h e r n i k o f f, R. & T a y l o r, F.V.: Reaction time to kinesthetic stimulation resulting from sudden arm displacement
Journal of Experimental Psychology, 1952, 43, 1-8

C h r i s t i n a, R.W.: Minimum visual feedback processing time for amendment of an incorrect movement
Perceptual and Motor Skills, 1970, 31, 991-994

C r a f t, H.L. & H i n r i c h s, J.V.: Short-term retention of simple motor responses: Similarity of prior and succeeding responses
Journal of Experimental Psychology, 1971, 87, 297-302

C r a i k, K.J.W.: Theory of the human operator in control systems. I: The operator as an engineering system
British Journal of Psychology, 1947, 38, 56-61

C r a i k, K.J.W.: Theory of the human operator in control systems. II: Man as an element in a control system
British Journal of Psychology, 1948, 38, 142-148

D e r w o r t, A.: Untersuchungen über den Zeitverlauf figurierter Bewegungen beim Menschen
Pflügers Archiv, 1938, 240, 661-675

E c c l e s, J.C.: Das Gehirn des Menschen
München: Piper 1975

E l l s o n, D.G.: The application of operational analysis to human motor behavior
Psychological Review, 1949, 56, 9-17

E l l s o n, D.G.: Linear frequency theory as a behavior theory
In: K o c h, S. (Hrsg.), 1959

F a u s t - A d a m s, A.S.: Interference in short-term retention of discrete movements
Journal of Experimental Psychology, 1972, 96, 400-406

F i n c h, G. & C a m e r o n, F. (Hrsg.): Symposium on Air Force Human Engineering, Personnell, and Training Research
Washington: National Academy of Sciences - National Research Council 1956

F i t t s, P.M., B e n n e t t, W.F. & B a h r i c k, H.P.: Application of auto-correlation and cross-correlation analysis to the study of tracking behavior
In: F i n c h, G. & C a m e r o n, F. (Hrsg.), 1956

F i t t s, P.M. & P e t e r s o n, J.R.: Information capacity of discrete motor responses
Journal of Experimental Psychology, 1964, 67, 103-112

F l e i s h m a n, E.A. & R i c h, S.: Role of kinesthetic and spatial-visual abilities in perceptual-motor learning
Journal of Experimental Psychology, 1963, 66, 6-11

F r e e d m a n, S.J. (Hrsg.): The Neuropsychology of Spatially Oriented Behavior
Homewood, Illinois: Dorsey Press 1968

F o p p a, K.: Lernen, Gedächtnis, Verhalten
Köln: Kiepenheuer & Witsch 1968

G i b b s, C.B.: Probability learning in step-input tracking
British Journal of Psychology, 1965, 56, 233-242

G l e n c r o s s, D.J.: Serial organization and timing in a motor skill
Journal of Motor Behavior, 1970, 2, 229-237

G l e n c r o s s, D.J.: Latency and response complexity
Journal of Motor Behavior, 1972a, 4, 251-256

G l e n c r o s s, D.J.: Effector organization and "gradation" of effort
Journal of Motor Behavior, 1972b, 4, 263-271

G l e n c r o s s, D.J.: Response complexity and the latency of different movement patterns
Journal of Motor Behavior, 1973, 5, 95-104

G r a n i t, R.: The Basis of Motor Control
London: Academic Press 1970

G r i e w, S.: Complexity of response and time of initiating responses in relation to age
American Journal of Psychology, 1959, 72, 83-88

H a c k e r, W.: Grundlagen der Regulation von Arbeitsbewegungen
Probleme und Ergebnisse der Psychologie, Beiheft 1, 1967

H a s s e n s t e i n, B.: Biologische Kybernetik
Heidelberg: Quelle & Meyer 1970

H a y e s, K.C. & M a r t e n i u k, R.G.: Dimensions of motor task complexity
In: S t e l m a c h, G.E. (Hrsg.), 1976

H e n r y, F.M. & H a r r i s o n, J.S.: Refractoriness of a fast movement
Perceptual and Motor Skills, 1961, 13, 351-354

H e n r y, F.M. & R o g e r s, D.E.: Increased response latency for complicated movements and a "memory-drum" theory of neuromotor reaction
Research Quarterly, 1960, 31, 448-458

H e u e r, H.: Zur Wirkung von Intervallen ohne visuelle Rückmeldung und ohne Arbeitstätigkeit auf die sensumotorische Koordination
Unveröffentlichte Diplomarbeit, Marburg 1973

H i g g i n s, J.R. & A n g e l, R.W.: Correction of tracking errors without sensory feedback
Journal of Experimental Psychology, 1970, 84, 412-416

H o l s t, E. v o n: Vom Wesen der Ordnung im Zentralnervensystem (1937)
In: H o l s t, E. v o n, 1969

H o l s t, E. v o n: Die relative Koordination als Phänomen und als Methode zentralnervöser Funtionsanalyse (1939)
In: H o l s t, E. v o n, 1969

H o l s t, E. v o n: Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen. Gesammelte Abhandlungen Band I
(Herausgegeben von B. H a s s e n s t e i n)
München: Piper 1969

H o w a r t h, C.I., B e g g s, W.D.A. & B o w d e n, J.M.: The relationship between speed and accuracy of movement aimed at a target
Acta Psychologica, 1971, 35, 207-218

J e f f r e s s, L.A. (Hrsg.): Cerebral Mechanisms in Behavior. The Hixon Symposium
New York: Wiley 1951

J o n e s, B.: Outflow and inflow in movement duplication
Perception and Psychophysics, 1972, 12, 95-96

J o n e s, B.: Is there any proprioceptive feedback? Comments on S c h m i d t (1971)
Psychological Bulletin, 1973, 79, 386-388

J o n e s, B.: Is proprioception important for skilled performance?
Journal of Motor Behavior, 1974a, 6, 33-45

J o n e s, B.: Role of central monitoring of efference in short-term memory for movements
Journal of Experimental Psychology, 1974b, 102, 37-43

K a h n e m a n, D.: Attention and Effort
Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall 1973

K a l v e r a m, K.Th.: Das Marburger System
Berichte aus dem Fachbereich Psychologie der Philipps-Universität Nr. 44
Marburg 1975

K a l v e r a m, K.Th., M e r z, F. & R i e g e l s, V.: Einfluß von Pausen auf die Leistung bei Steuertätigkeiten
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Forschungsbericht Nr. 112, Dortmund, 1973

K a n t o w i t z, B.H. (Hrsg.): Human Information Processing: Tutorials in Performance and Cognition
Hillsdale, N.J.: Erlbaum 1974

K e e l e, S.W.: Movement control in skilled motor performance
Psychological Bulletin, 1968, 70, 387-403

K e e l e, S.W.: Current status of the motor program concept
Proceedings of the North American Society for the Psychology of Sport and Physical Activity, Austin, Texas 1976

K e e l e, S.W. & P o s n e r, M.I.: Processing of visual feedback in rapid movements
Journal of Experimental Psychology, 1968, 77, 155-158

K e e l e, S.W. & S u m m e r s, J.J.: The structure of motor programs
In: S t e l m a c h, G.E.(Hrsg.), 1976

K e l s o, J.A.S., S t e l m a c h, G.E. & W a n a m a k e r, W.M.: Behavioral and neurological parameters of the nerve compression block
Journal of Motor Behavior, 1974, 6, 179-190

K e l s o, J.A.S., W a l l a c e, S.A., S t e l m a c h, G.E. & W e i t z, G.A.: Sensory and motor impairment in the nerve compression block
Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1975, 27, 123-129

K e r n, G.: Motorische Umreißung optischer Gestalten
Neue Psychologische Studien, Bd. 9, 1933, S. 65-104

K l a p p, S.T.: Feedback versus motor programming in the control of aimed movements
Journal of Experimental Psychology, 1975, 104, 147-153

K l a p p, S.T., W y a t t, E.P. & L i n g o, W.M.:
Response programming in simple and choice reactions
Journal of Motor Behavior, 1974, 6, 263-271

K n a p p, H.D., T a u b, E. & B e r m a n, A.J.:
Movements in monkeys with deafferent forelimbs
Experimental Neurology, 1963, 7, 305-315

K o c h, S. (Hrsg.): Psychology: A Study of a Science, II: General Systematic Formulations, Learning, and Special Processes
New York: McGraw-Hill 1959

K r e n d e l, E.S. & M c R u e r, D.T.: A servomechanisms approach to skill development
Journal of the Franklin Institute, 1960, Vol. 269, No. 1

K ü p f m ü l l e r, K. & P o k l e k o w s k i, P.:
Der Regelmechanismus willkürlicher Bewegungen
Zeitschrift für Naturforschung, 1956, 11b, 1-7

L a a b s, G.J.: The effect of interpolated motor activity on the short-term retention of movement distance and end-location
Journal of Motor Behavior, 1974, 6, 279-288

L a g a s s e, P.P. & H a y e s, K.C.: Premotor and motor reaction time as a function of movement extent
Journal of Motor Behavior, 1973, 5, 25-32

L a s h l e y, K.S.: The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ
American Journal of Physiology, 1917, 43, 169-194

L a s h l e y, K.S.: The problem of serial order in behavior
In: J e f f r e s s, L.A. (Hrsg.), 1951

L a s z l o, J.I.: The performance of a simple motor task with kinesthetic sense loss
Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1966, 18, 1-8

L a s z l o, J.I. & B a g u l e y, R.A.: Motor memory and bilateral transfer
Journal of Motor Behavior, 1971, 3, 235-240

L a s z l o, J.I., B a g u l e y, R.A. & B a i r s t o w, P.J.: Bilateral transfer in tapping skill in the absence of peripheral information
Journal of Motor Behavior, 1970, 2, 261-271

L a s z l o, J.I. & B a i r s t o w, P.J.: Accuracy of movement, peripheral feedback and efference copy
Journal of Motor Behavior, 1971a, 3, 241-252

L a s z l o, J.I. & B a i r s t o w, P.J.: The compression block technique: a note on procedure
Journal of Motor Behavior, 1971b, 3, 313-317

L a s z l o, J.I. & B a k e r, J.E.: The role of visual cues in movement control and motor memory
Journal of Motor Behavior, 1972, 4, 71-78

L a s z l o, J.I. & M a n n i n g, L.C.: The role of motor programming, command, and standard in the control of skilled movement
Journal of Motor Behavior, 1970, 2, 111-124

L i c k l i d e r, J.C.R.: Quasi-linear operator models in the study of manual tracking
In: L u c e, R.D. (Hrsg.), 1960

L i n n, K.O.: Untersuchung des Kraftverlaufs bei Willkürbewegungen
Dissertation, Karlsruhe 1974

L i u, I.-M.: Effects of repetition of voluntary response: from voluntary to involuntary
Journal of Experimental Psychology, 1968, 76, 398-406

L u c e, R.D. (Hrsg.): Developments in Mathematical Psychology
Illinois: The Free Press of Glencoe 1960

M a c K a y, D.M.: Towards an information-flow model of human behavior
British Journal of Psychology, 1956, 47, 30-43

M a r i e n f e l d, H.: Modelle für den "Regler Mensch" - ein Praktikumsversuch
In: O p p e l t, W. & V o s s i u s, G. (Hrsg.), 1970

M a r t e n i u k, R.G.: Retention characteristics of motor short-term memory cues
Journal of Motor Behavior, 1973, 5, 249-259

M a r t e n i u k, R.G.: Cognitive information processes in motor short-term memory and movement production
In: S t e l m a c h, G.E. (Hrsg.), 1976

M a r t e n i u k, R.G. & R o y, E.A.: The codability of kinesthetic location and distance information
Acta Psychologica, 1972, 36, 471-479

M a r t e n i u k, R.G., S h i e l d s, K.W.D. & C a m p b e l l, S.: Amplitude, position, timing, and velocity as cues in reproduction of movement
Perceptual and Motor Skills, 1972, 35, 51-58

M c R u e r, D.T. & K r e n d e l, E.S.: The human operator as a servo system element
Journal of the Franklin Institute, 1959, Vol. 267, No. 5,6

M e g a w, E.D.: Direction and extent uncertainty in step-input tracking
Journal of Motor Behavior, 1972a, 4, 171-186

M e g a w, E.D.: Directional errors and their correction in a discrete tracking task
Ergonomics, 1972b, 15, 633-643

M e r t o n, P.A.: Speculations on the servo control of movement
In: W o l s t e n h o l m e, G.E.W. (Hrsg.), 1953

M e r t o n, P.A.: Human position sense and sense of effort
Homeostasis and Feedback Mechanisms; 18th Symposium of the Society for Experimental Biology
Cambridge: University Press 1964

M e r t o n, P.A.: How we control the contraction of our muscles
Scientific American, 1972, 226, 30-37

M e r z, F., A l b e r t, D. & G i e s e n, H.: Der Ablauf willkürlicher Bewegungen und seine Beeinflussung durch den Handlungserfolg
Wissenschaftlicher Abschlußbericht für die Hohe Behörde, Marburg 1971

O p p e l t, W. & V o s s i u s, G. (Hrsg.): Der Mensch als Regler
Berlin: Verlag Technik 1970

P a i l l a r d, J. & B r o u c h o n, M.: Active and passive movements in the calibration of position sense
In: F r e e d m a n, S.J. (Hrsg.), 1968

P a t r i c k, J.: The effect of interpolated motor activities in short-term motor memory
Journal of Motor Behavior, 1971, 3, 39-48

P e w, R.W.: Toward a process-oriented theory of human skilled performance
Journal of Motor Behavior, 1970, 2, 8-24

P e w, R.W.: Human perceptual motor performance
In: K a n t o w i t z, B.H. (Hrsg.), 1974

P o s n e r, M.I.: Characteristics of visual and kinesthetic memory codes
Journal of Experimental Psychology, 1967, 75, 103-107

P o s n e r, M.I.: Kognitive Psychologie
München: Juventa 1976

P o u l t o n, E.C.: Tracking behavior
In: B i l o d e a u, E.A. (Hrsg.), 1966

P o u l t o n, E.C.: Tracking Skill and Manual Control
New York: Academic Press 1973a

P o u l t o n, E.C.: Unwanted range effects from using within-subject experimental designs
Psychological Bulletin, 1973b, 80, 113-121

P u r i, M.L. & S e n, P.K.: Nonparametric Methods in Multivariate Analysis
New York: Wiley 1971

R a b b i t t, P.M.A.: Errors and error correction in choice response tasks
Journal of Experimental Psychology, 1966, 71, 264-272

R a b b i t t, P.M.A.: Time to detect errors as a function of factors affecting choice response time
Acta Psychologica, 1967, 27, 131-142

R e s t l e, F.: Theory of serial pattern learning: structual trees
Psychological Review, 1970, 77, 481-495

R e s t l e, F. & B r o w n, E.R.: Serial pattern learning
Journal of Experimental Psychology, 1970, 83, 120-125

R e s t l e, F. & B u r n s i d e, B.L.: Tracking of serial patterns
Journal of Experimental Psychology, 1972, 95, 299-307

R o s e n b a u m, D.A.: Selektive adaptation of "command neurons" in the human motor system
Neuropsychologica, 1977, 15, 81-91

R o y, E.A. & D a v e n p o r t, W.G.: Factors in motor short-term memory: the interference effect of interpolated activity
Journal of Experimental Psychology, 1972, 96, 134-137

R ü s s e l, A.: Das Wesen der Bewegungskoordination
Archiv für die gesamte Psychologie, 1944, 112, 1-22

R ü s s e l, A.: Psychomotorik
Darmstadt: Steinkopff 1976

R u s s e l l, D.G.: Spatial location cues and movement production
In: S t e l m a c h, G.E. (Hrsg.), 1976

S a c h s, L.: Statistische Auswertungsmethoden
Berlin: Springer 1969

S c h l i t t, H.: Systemtheorie für regellose Vorgänge
Berlin: Springer 1960

S c h m i d t, R.A.: Movement time as a determiner of timing accuracy
Journal of Experimental Psychology, 1969, 79, 43-47

S c h m i d t, R.A.: The index of preprogramming (IP): a statistical method for evaluating the role of feedback in simple movements
Psychonomic Science, 1972, 27, 83-85

S c h m i d t, R.A.: A schema theory of discrete motor skill learning
Psychological Review, 1975, 82, 225-260

S c h m i d t, R.A.: The schema as a solution to some persistent problems in motor learning theory
In: S t e l m a c h, G.E. (Hrsg.), 1976

S c h m i d t, R.A. & R u s s e l l, D.G.: Movement velocity and movement time as determiners of degree of preprogramming in simple movements
Journal of Experimental Psychology, 1972, 96, 315-320

S c h m i d t, R.A. & W h i t e, J.L.: Evidence for an error detection mechanism in motor skills: a test of A d a m s' closed-loop theory
Journal of Motor Behavior, 1972, 4, 143-153

S c h m i d t, R.A. & W r i s b e r g, C.A.: Further tests of A d a m s' closed-loop theory: response-produced feedback and the error detection mechanism
Journal of Motor Behavior, 1973, 5, 155-164

S c h m i d t k e, H.: Über die Struktur willkürlicher Bewegungen
Psychologische Beiträge, 1960, 5, 428-439

S c h w e i z e r, G.: Probleme und Methoden zur Untersuchung des Regelverhaltens des Menschen
In: O p p e l t, W. & V o s s i u s, G. (Hrsg.), 1970

S e a r l e, L.V. & T a y l o r, F.V.: Studies of tracking behavior. I: rate and time characteristics of simple corrective movements
Journal of Experimental Psychology, 1948, 38, 615-631

S l a c k, C.W.: Learning in simple one-dimensional tracking
American Journal of Psychology, 1953, 66, 33-44

S t e l m a c h, G.E.: Prior positioning responses as a factor in short-term retention of a simple motor task
Journal of Experimental Psychology, 1969a, 81, 523-526

S t e l m a c h, G.E.: Short-term motor retention as a function of response-similarity
Journal of Motor Behavior, 1969b, 1, 37-44

S t e l m a c h, G.E. (Hrsg.): Motor Control: Issues and Trends
New York: Academic Press 1976

S t e l m a c h, G.E. & B a r b e r, J.L.: Interpolated activity in short-term motor memory
Perceptual and Motor Skills, 1970, 30, 231-234

S t e l m a c h, G.E., K e l s o, J.A.S. & W a l l a c e, S.A.: Preselection in short-term motor memory
Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 1975, 1, 745-755

S t e l m a c h, G.E. & W a l s h, M.F.: The temporal placement of interpolated movements in short-term motor memory
Journal of Motor Behavior, 1973, 5, 165-173

T a u b, E.: Prism compensation as a learning phenomenon: a phylogenetic perspective
In: F r e e d m a n, S.J. (Hrsg.), 1968

T a u b, E. & B e r m a n, A.J.: Movement and learning in the absence of sensory feedback
In: F r e e d m a n, S.J. (Hrsg.), 1968

T a y l o r, F.V. & B i r m i n g h a m, H.P.: Studies of tracking behavior. II: The acceleration pattern of quick manual corrective responses
Journal of Experimental Psychology, 1948, 38, 783-795

T r u m b o, D.: Acquisition and performance as a function of uncertainty and structure in serial tracking tasks
Acta Psychologica, 1970, 33, 252-266

T r u m b o, D., N o b l e, M. & Q u i g l e y, J.: Sequential probabilities and the performance of serial tasks
Journal of Experimental Psychology, 1968, 76, 364-372

U l l m a n n, J.F.: Psychologie der Lateralität
Bern: Huber 1974

V a u g h a n, H.G., G r o s s, E.G. & B o s s o m, J.: Cortical motor potential in monkeys before and after upper limb deafferentation
Experimental Neurology, 1970, 26, 253-262

V i n c e, M.A.: Corrective movements in a pursuit task
Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1948, 1, 85-103

V o s s i u s, G.: Der sogenannte "innere" Regelkreis der Willkürbewegung
Kybernetik, 1961, 1, 28-32

V o s s i u s, G. & C h o u d h r y, A.: Die Regelung der menschlichen Handbewegung bei großer Treffgenauigkeit
Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie, 1958, 268, 75-86

W a s s m u n d, B.: Der Einfluß der visuellen Regulation auf die raum-zeitliche Struktur der Handbewegungsbahn
Probleme und Ergebnisse der Psychologie, 1968, 24, 17-32

W i l l i a m s, L.R.T.: Perceived occurrence of the second of two closely spaced stimuli in a long movement
Journal of Motor Behavior, 1970, 2, 175-181

W i l l i a m s, L.R.T.: Refractoriness of an extended movement to directional change
Journal of Motor Behavior, 1971a, 3, 289-300

W i l l i a m s, L.R.T.: Refractoriness of a long movement
Research Quarterly, 1971b, 42, 212-219

W o l s t e n h o l m e, G.E.W. (Hrsg.): The spinal cord
Boston: Little, Brow 1953

W o o d w o r t h, R.S. & S c h l o s b e r g, H.: Experimental Psychology
New York: Holt, Rinehart & Winston 1954

A n h a n g

Im folgenden soll die multivariate Verallgemeinerung des H-Tests, die bei der Auswertung beider Versuche verwendet wurde, kurz beschrieben werden. Diese Darstellung beschränkt sich auf das für das Verständnis des Verfahrens notwendigste; für Ableitungen und spezielle Fälle (z.B. viele Bindungen) sei auf die Originalliteratur verwiesen: P u r i & S e n (1971, S. 181-195). (Ein entsprechendes FORTRAN-Programm, das auch multivariate Verallgemeinerungen des Friedman-Tests und des Wilcoxon-Tests für Paardifferenzen enthält, kann zur Verfügung gestellt werden.)

Indizes: $i = 1, \ldots, n$, $n = n_1 + n_2 + \ldots n_c$ für die Vpn
$l = 1, \ldots, c$ für die Gruppen
$i_1 = 1, \ldots, n_1$ für die Vpn in Gruppe 1
$k,k' = 1, \ldots, p$ für die Variablen

Berechnung der Teststatistik

Das Ergebnis des Experiments ist eine Matrix folgender Art:

$$(3.1)\quad X = \begin{matrix} x_{11} \cdots x_{n_1 1} \cdots \cdots x_{n1} \\ \cdot \quad\quad \cdot \quad\quad\quad \cdot \\ \cdot \quad\quad \cdot \quad\quad\quad \cdot \\ x_{1p} \cdots x_{n_1 p} \cdots \cdots x_{np} \end{matrix}$$

Für jede Zeile dieser Matrix wird eine Rangreihe gebildet, also, für jede Variable über die n Vpn aller c Gruppen. Man erhält dann die Rangmatrix:

$$(3.2)\quad R = \begin{matrix} r_{11} \cdots r_{n_1 1} \cdots \cdots r_{n1} \\ \cdot \quad\quad \cdot \quad\quad\quad \cdot \\ \cdot \quad\quad \cdot \quad\quad\quad \cdot \\ r_{1p} \cdots r_{n_1 p} \cdots \cdots r_{np} \end{matrix}$$

Aus dieser Matrix wird für jede Gruppe ein Vektor $T_l=(t_{l1},\ldots,t_{lk},\ldots,t_{lp})'$ berechnet mit

$$(3.3)\quad t_{lk} = \frac{1}{(n+1)n_l} \sum_{i_l=1}^{n_l} r_{i_l k} - 0.5$$

Ferner wird aus der Matrix R die Matrix $V=((v_{kk'}))$ berechnet mit

$$(3.4)\quad v_{kk'} = \frac{1}{n(n+1)^2} \sum_{i=1}^{n} r_{ik} r_{ik'} - 0.25$$

Die Matrix V ist symmetrisch um die Hauptdiagonale; die Werte in der Hauptdiagonalen sind:

$$(3.5)\quad v_{kk} = \frac{1}{n(n+1)^2} \sum_{i=1}^{n} r_{ik}^2 - 0.25$$

$$= \frac{2n+1}{6(n+1)} - 0.25 = \frac{n-1}{12(n+1)}$$

Für die Berechnung der Teststatistik werden die Vektoren T_l und die Inverse der Matrix V benötigt:

$$(3.6)\quad L_n = \sum_{l=1}^{c} n_l \, (T_l V^{-1} T_l')$$

Testverteilung

Die Berechnung der Permutationsverteilung für eine bestimmte Kovarianzmatrix der p Variablen beruhen auf folgendem Prinzip: Bei Geldung der Nullhypothese, daß die Mittelwerte in allen c Gruppen gleich sind, gibt es n! gleichwahrscheinliche Realisierungen der Matrix R, die

man durch vollständige Permutation der Spalten erhält; daß die Spalten zu Vpn mit unterschiedlichen Gruppenzugehörigkeiten gehören, spielt dann keine Rolle.

Dieses grundlegende Permutationsprinzip gilt stets für die Vpn innerhalb einer Gruppe, also auch dann, wenn H_0 nicht zutreffend ist. Genau genommen ist für die Nullhypothese spezifisch, daß das Permutationsprinzip über die Gruppen hinweg gilt, d.h., ein spezieller Ergebnisvektor tritt dann mit gleicher Wahrscheinlichkeit bei Vpn aus verschiedenen Gruppen auf. Die $n_1!...n_1!...n_c!$ Permutationen der Spalten, bei denen die Gruppengrenzen nicht überschritten werden, können folglich vernachlässigt werden. Zudem führen diese Permutationen zu gleichen Werten der Teststatistik. Die Permutationsverteilung umfaßt also

$$n! \Big/ \prod_{l=1}^{c} n_l \quad \text{Werten.}$$

Für großes n kann statt der nur mit großem Aufwand zu berechnenden exakten Permutationsverteilung die Chi-Quadrat-Verteilung mit p(c-1) Freiheitsgraden als Prüfverteilung verwendet werden (P u r i & S e n, S. 193).

Lebenslauf

Ich wurde 1m 15.8.1948 als Sohn der Eheleute Friedrich und Hilde Heuer, geb. Albers, in Cuxhaven geboren. Dort besuchte ich von 1955 bis 1959 die Volksschule und anschließend das Gymnasium für Jungen, an dem ich 1967 das Abitur ablegte.

Nach dem Wehrdienst begann ich 1969 das Studium der Psychologie an der Philipps-Universität Marburg und legte dort 1971 die Diplom-Vorprüfung und 1973 die Diplom-Hauptprüfung ab. In den Jahren 1974 und 1975 wurde ich durch ein Promotionsstipendium nach dem Graduiertenförderungsgesetzt unterstützt.

Im Anschluß daran hatte ich eine Stelle als wissenschaftlicher Angestellter in einem Forschungsprojekt an der Universität Marburg inne. Seit Herbst 1976 bin ich als Verwalter der Stelle eines wissenschaftlichen Assistenten an der Universität Bielefeld tätig.